

Mag - Bib - 182/04

UNIVERSITE ABOU BEKR BELKAID-TLEMCEM

N° d'ordre : 17/DST/10



FACULTE DES SCIENCES DE LA NATURE DE LA VIE
ET DES SCIENCES DE LA TERRE ET DE L'UNIVERS

DEPARTEMENT DES SCIENCES DE LA TERRE ET DE L'UNIVERS

LABORATOIRE RESSOURCES HYDRIQUES, MINIERES ET PEDOLOGIQUES :
CHOIX TECHNOLOGIQUE ET LEGISLATION DE L'ENVIRONNEMENT

MEMOIRE DE MAGISTER

Option

Ressources en Eau dans leur Environnement

Présenté par

BOUANANI Rahima

MODELISATION DE LA FONCTION PLUIE – DEBIT.
APPLICATION AU BASSIN VERSANT DE LA TAFNA (NW – ALGERIEN)

Soutenu le 02/10/2010 devant les membres du jury :

Mr Mustapha BENSALAH	Professeur	Univ. Tlemcen	Président
Mr Abderrazak BOUANANI	Maître de conférences A	Univ. Tlemcen	Encadreur
Mme Fouzia ADJIM	Maître de conférences A	Univ. Tlemcen	Examineur
Mr Abdesselam MEGNOUNIF	Maître de conférences B	Univ. Tlemcen	Examineur
Mme Kamila BABA-HAMED	Maître de conférences B	Univ. Tlemcen	Invitée

Plus l'artiste se penche avec impartialité vers le détail

Plus l'anarchie n'augmente

Baudelaire, *le peintre de la vie moderne*

DEDICACES

Je dédie ce travail à :

La mémoire de mon père

Ma très chère mère qui n'a jamais cessé de m'encourager tous le long de mon parcours et qui s'est toujours sacrifiée pour faire de moi ce que je suis que dieu la protège.

A ma belle sœur Kamila et mon frère Abdou et qui n'ont jamais cessé de m'encourager et m'aider et me donner des conseils que dieu les protège.

Ma nièce Wissal et mon neveu Ihab que dieu les protège.

A toute ma famille

Rahima

Sommaire

Introduction générale.....	01
CHAPITRE I : L'ETAT DE L'ART DE LA MODELISATION HYDROLOGIQUE	
Introduction.....	04
I.2 Calage et performance d'un modèle hydrologique.....	05
I.2.1 Généralité sur le calage et la performance d'un modèle	05
I.2.2 Les méthodes automatiques de calage des modèles.....	06
I.2.2.1 Les méthodes locales.....	06
I.2.2.2 Les méthodes globales.....	06
I.2.3 L'évaluation de la performance.....	07
I.2.3.1 La performance potentielle en calage.....	07
I.2.3.2 La performance en validation.....	07
I.2.3.3 La performance en transposition spatiale.....	07
I.2.3.4 La performance en prévision.....	07
I.2.4 Les critères de performance.....	07
I 2-5 L'intérêts d'un modèle pluie- débit.....	09
I-2-6 Pourquoi des modèles hydrologiques ?.....	10
I-3. Les différentes approches de la modélisation.....	11
I-3-1 Modèles stochastiques.....	11
I-3-2 Modèles déterministes.....	12
I-3-3 Modèles à base physique.....	12
I-3-4 Modèles paramétriques.....	13
I-3-5 Modèles empiriques.....	14
I-3-6 Modèles analytiques.....	14
I-3-7 modèles conceptuels.....	14
I-3-8 modèles globaux.....	16
I-3-9 Modèle Spatialisés.....	17
I.3.10 Modèle physique-conceptuel semi-spatialisé(TOPMODEL).....	17
I.3.11 Les modèles neuronaux.....	18
I.3.12 Conclusion.....	20
I .4 Le Modèle GR.....	21
I.4.1 Objectifs de développement.....	21
I.4.2 Mode de développement.....	21
I.4. 3 Description du modèle pluie-débit annuel GR1A.....	21
I.4.3.1 Introduction.....	21
I.4.3.2 Description mathématique.....	22
I.4.3.3 Paramètre.....	22
I.4.4 Description du modèle pluie-débit mensuel GR2M.....	22
I.4.4.1 Introduction.....	22
I.4.4.2 Description mathématique.....	23
I.4.4.3 Paramètres.....	24
I.5 Applications des modèles.....	25
I.6 Conclusions et perspectives.....	26
CHAPITRE II PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE	
II -1 Présentation de la zone d'étude.....	28
II.2 Géologie et interaction hydrologique.....	29

Annexe.....	80
Liste des figures	106
La liste des tableaux.....	108
La liste des figures	
Figure 1 : Représentation du fonctionnement d'un modèle hydrologique (Mathevet, 2005)	04
Figure 2: Organigramme de calibrage et validation des modèles hydrologiques (R. Leconte 2007)	09
Figure 3: les différentes applications de la modélisation pluie débit (Perrin, 2000)	10
Figure 4 : les différentes approches de modélisation (Gaume ; 2002)	11
Figure 5: Structure du modèle SHE (Perrin 2000)	13
Figure 6 : La fonction de production du modèle hydrologique CEQUEAU (G. Morin 1991)	15
Figure 7 : La fonction de transfert du modèle CEQUEAU (G. Morin 1991)	15
Figure 8 : modèle hydrologique GR	16
Figure 9: Structure du modèle TOPMODEL (Henine 2005)	17
Figure 10 : La fonction sigmoïde (ou logistique), quasi linéaire sur l'intervalle [-1,1] (Gosset. 2000).	19
Figure 11 : Perceptron à n entrées et une sortie (Gosset, 2000)	20
Figure 12 : Schéma de la structure du modèle GR2M	23
Figure 13 : Délimitation du bassin versant de l'Oued Tafna (Google, Earth)	28
Figure 14 : Réseau hydrographique de la Tafna (Google Earth)	29
Figure 15 : Schéma structurale de la chaîne alpine de la Méditerranée occidentale (Benest, 1985)	30
Figure 16: Colonne stratigraphique des monts de Tlemcen jusqu'aux hautes plaines (Benest & Bensalah 1999)	32
Figure 17: Situation des sous bassins versants de l'oued Sebdou, Mefrouche et Sikkak	34
Figure 18 : Carte de pente du bassin de l'oued Sebdou	35
Figure 19 : Carte lithologique du bassin versant de l'oued Sebdou (Bouanani; 2004)	36
Figure 20 : Cartes D'occupation Du Sol De L'oued Sebdou (Bouanani ; 2004)	36
Figure 21 : Réseau hydrographique du bassin Meffrouche	37
Figure 22: Carte lithologique du bassin versant d'oued Nacheff (Meffrouche)	38
Figure 23 : Carte lithologique du bassin versant d'oued Sikkak (Bouanani ; 2004)	39
Figure 24: carte d'occupation du sol du bassin versant d'oued Sikkak (Bouanani ; 2004)	39
Figure 25 : Variations interannuelles des précipitations des différents sous bassins	42
Figure 26: Variation des précipitations mensuelles des différents sous bassins	43
Figure 27 : Distribution des précipitations Saisonnières des différents sous bassins	44
Figure 28: L'ajustement graphique des précipitations de chaque sous bassin	46
Figure 29: variation interannuelle des lames d'eau écoulées des différents sous bassins	47
Figure 30 : Variation mensuelles des lames d'eau écoulées des différents sous bassins	48
Figure 31: L'ajustement graphique des lames d'eau écoulées de chaque sous bassin	49
Figure 32 : Variation des Températures Annuelles (1964-2007).	50
Figure 33 : variation des températures moyennes mensuelles	51
Figure 34: variation des ETP Turc et thornthwaite pour les trois sous bassins	53
Figure 35 : régression orthogonale (J ; Llamas, 1934)	55

Introduction générale

Les eaux des oueds sont une ressource de plus en plus utilisée à des fins variées. Elles peuvent également présenter une menace pour les populations riveraines ou les ouvrages d'art. Les hydrologues, dont ces eaux sont l'objet d'étude, sont en conséquence sollicités pour la prévision des crues ou des étiages, la prédétermination des débits pour le dimensionnement d'ouvrages d'art, ou le dimensionnement de réservoirs de stockage d'eau ou d'écrêtement des crues. Mais pour fournir aux ingénieurs de bons outils pour la gestion de l'eau, l'hydrologue doit identifier les modèles qui représentent le comportement des bassins versants.

La résolution des problèmes liée à la gestion des bassins versants notamment l'aménagement de ponts et de barrages, la prévision des conséquences des inondations nécessite une parfaite connaissance de leurs étiages et de leur crues. Dans cette optique, l'utilisation d'un modèle de calcul des débits d'estimation des eaux à l'échelle d'un bassin versant devient nécessaire

Les problèmes peuvent se poser en tout point d'un réseau hydrographique. Pour y répondre l'hydrologue doit disposer des données permettant la paramétrisation de modèles pertinents. Malheureusement, il ne dispose pas toujours des données d'une station de mesure des écoulements sur le point hydrographique auquel il s'intéresse. Le plus souvent, cependant, l'hydrologue dispose de données de pluie qui sont généralement beaucoup plus abondantes et mieux distribuées spatialement que les séries de débit. C'est la raison qui nous pousse naturellement à nous intéresser aux modèles pluie-débit : ils nous permettent de reconstituer ou de compléter des séries de débit à partir des séries de pluie.

Les modèles pluie-débit s'adaptent aux particularités du comportement hydrologique d'un bassin versant au travers de leurs paramètres. Pour pouvoir appliquer utilement ces modèles, l'hydrologue a besoin d'une méthode permettant de déterminer leurs paramètres, quel que soit le bassin versant.

Le plus simple serait de pouvoir s'appuyer sur des relations régionales obtenues en établissant des liens statistiques entre les valeurs des paramètres et des descripteurs climatiques ou physiques des bassins. Cependant, la nature individuelle des bassins versants et la grande complexité des déterminants hydrologiques rendent délicate toute application directe des formulations régionales pour déterminer la valeur des paramètres. Les modèles restent, dans ces conditions, à des niveaux de performance souvent incompatibles avec les exigences de fiabilité opérationnelle.

L'objectif principal de ce travail est d'utiliser quelques mesures ponctuelles de débit d'un oued, pour estimer les paramètres d'un modèle pluie-débit. Nous proposons ici une voie nouvelle où sont combinées une information hydrologique régionale et une information locale issue de mesures ponctuelles.

Pour ce faire, nous allons utiliser les modèles du Génie rural (GR), que nous appliquons aux données de quelque sous bassins de la Tafna. Cette recherche est exposée en quatre chapitres ;

Le premier chapitre présente l'état de l'art de la modélisation pluie-débit sur les sites hydrographiques sans station hydrométrique. Elle présente notre approche qui consiste à

exploiter quelques mesures ponctuelles de débit, pour la détermination des paramètres d'un modèle pluie-débit.

Le deuxième chapitre présente des généralités sur le bassin versant de la Tafna, et la présentation générale des trois sous bassins (Haute-Tafna à BeniBahdel, Meffrouche, et Sikkak)

Dans le troisième chapitre, nous procédons à une étude des paramètres hydrologiques de chaque sous bassin qui seront introduit par la suite dans le modèle.

Le quatrième chapitre est consacré à la recherche de modèles pluie-débit pour les trois sous bassins de la Tafna où deux approches sont utilisées ; l'une par corrélations simples, l'autre par l'application un modèle à réservoirs pour les pas de temps annuelle et mensuelle.

Enfin nous terminons notre travail par une conclusion générale.

CHAPITRE I

**L'ETAT DE L'ART DE LA
MODELISATION HYDROLOGIQUE**

INTRODUCTION :

La modélisation en hydrologie ; et particulièrement la transformation des précipitations en débit, est un sujet qui n'est jamais démodé, car situé au cœur de l'hydrologie. On peut lire dans l'abondante littérature existante que les recherches menées dans ce domaine se continuent, non seulement pour développer ou améliorer les modèles existants, mais aussi pour créer des modèles nouveaux.

L'intérêt d'un modèle réside dans sa capacité à apporter une réponse (satisfaisant) aux questions que l'on se pose à propos de l'objet modélisé, ce qui nous renvoie à l'objet assigné au modèle qui doit bien entendu précéder et orienter la conception et la construction du modèle. Généralement les modèles sont utilisés pour la prévision, la prédétermination, la reconstitution ou l'extrapolation de données, etc.

Dans ce chapitre nous présentons les modèles les plus utilisés dans le domaine de la modélisation hydrologique ainsi que les logiciels les plus utilisés dans le domaine public.

I-1 Quelques éléments de vocabulaire :

La modélisation hydrologique comme la modélisation mathématique d'une manière générale a son vocabulaire propre que nous présentons succinctement ici.

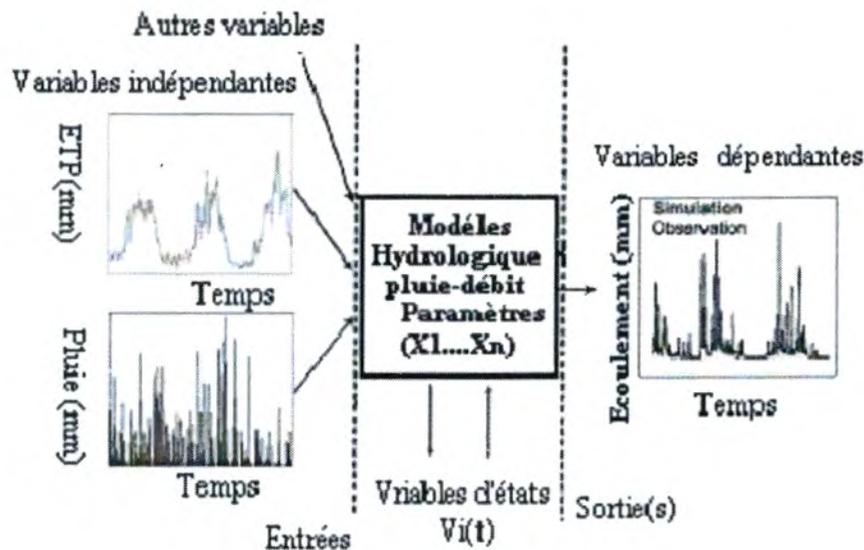


Figure 1 : Représentation du fonctionnement d'un modèle hydrologique (Mathevet, 2005)

Variables indépendantes ou variables d'entrée ou fonctions de forçage : données d'entrée du modèle. Dans le cas des modèles hydrologiques, il s'agit essentiellement des mesures de pluie et d'ETP. Les modèles hydrologiques sont des modèles dynamiques, les données d'entrée fluctuent en fonction du temps. Certains modèles utilisent des données d'entrée spatialement distribuées.

Variables dépendantes ou variables de sortie : il s'agit essentiellement des débits mais aussi des flux ou concentrations en polluants et matériaux érodés simulés à l'exutoire du bassin versants. Cette présentation se limitera aux modèles de simulation pluie débits.

Variables d'état : variables permettant de caractériser l'état du système modélisé, qui peuvent évoluer en fonction du temps dans un modèle dynamique. Il s'agit, par exemple, du niveau de

remplissage des différents «réservoirs» d'eau du bassin versant, du taux de saturation des sols, mais aussi de la profondeur des sols, des pentes Certaines variables d'état sont mesurables.

Paramètres : la notion de paramètre est intimement liée à celle de modèles conceptuels ou empiriques. Dans de nombreux cas, il n'est pas possible de représenter dans un modèle le processus physique parce que l'échelle de ce processus est trop petite et que les variables d'état contrôlant le processus ne sont pas accessibles à la mesure. Un modèle plus global est alors utilisé pour décrire le processus, mais certaines de ses variables d'état n'ont plus de sens physique, et ne peuvent plus être reliées à des variables mesurables. Ces variables, dont la valeur doit être déterminée par calage, sont appelées paramètres.

I.2 Calage et performance d'un modèle hydrologique : (Marchandise; 2007)

I.2.1 Généralité sur le calage et la performance d'un modèle :

Le calage d'un modèle consiste à déterminer, sur un échantillon d'événements de référence, un ou plusieurs jeux de paramètres avec lesquels les simulations du modèle approchent au mieux les hydrogrammes de la base de données de référence.

La plupart du temps, on utilise une méthode d'optimisation qui détermine un jeu « optimal », au sens où la distance entre les simulations du modèle et les hydrogrammes de référence est minimale. La nécessité de cette phase de calage des paramètres a plusieurs origines :

La schématisation du fonctionnement du bassin versant repose sur des objets conceptuels (de type réservoir) dont les paramètres n'ont pas de signification hydrologique et ne sont donc pas mesurables.

Le modèle repose sur des hypothèses physiques qui ne sont pas acceptables pour le fonctionnement du bassin considéré. Le calage aura donc tendance à identifier un comportement marginal du modèle, en forçant les paramètres vers des valeurs dont l'interprétation ne correspond pas à la physique du modèle. L'intégration et la résolution des équations différentielles qui régissent le fonctionnement interne d'un modèle distribué peuvent être soumises à un biais numérique qui fait dépendre la valeur du paramètre de la taille de la maille de résolution des équations.

La variabilité spatiale d'un descripteur du bassin versant n'est pas appréhendée par le modèle (faute de données ou mesures disponibles). Il s'agit alors de caler un paramètre qui sera représentatif de la valeur moyenne du paramètre sur le bassin.

Les données fournies à l'entrée et à la sortie des modèles sont soumises à des incertitudes de mesure. Le calage des paramètres du modèle doit permettre de compenser ces erreurs. Pour caler un modèle, il faut donc choisir :

- Une base de données d'événements (pluie et hydrogrammes de crue) de référence.
- Un critère ou indicateur pour évaluer l'ajustement des simulations du modèle aux données de calage pour un jeu de paramètres donné.
- Une méthode d'exploration de l'espace des paramètres du modèle.

Pour explorer les paramètres et pour évaluer les modélisations, on peut procéder « à la main », en testant des jeux de paramètres au hasard ou prédéfinis et en évaluant visuellement l'ajustement des simulations des modèles aux données de référence. Cette méthode s'appliquera si on a une bonne connaissance de la sensibilité des différents paramètres du modèle et/ou si le modèle est relativement parcimonieux. Dans le cas contraire, on utilisera une méthode d'optimisation automatique associée à des critères de performance.

On propose dans le paragraphe suivant des méthodes automatiques de calage des modèles. On présentera ensuite les critères d'évaluation des performances des simulations des modèles utilisés.

I.2.2 Les méthodes automatiques de calage des modèles

On distingue deux méthodes une méthode locale et l'autre globale ;

I.2.2.1 Les méthodes locales

Une méthode d'optimisation locale part d'un vecteur de paramètres donné par l'utilisateur et se déplace de manière itérative, par variations infinitésimales du vecteur des paramètres, vers des zones de critère de performances croissant. Elle s'arrête lorsqu'elle ne trouve plus de jeux de paramètres plus performants dans le voisinage d'un jeu de paramètres considéré alors comme optimal. On introduit une différenciation dans la terminologie des méthodes suivantes

Que, au cours de son itération, la méthode est basée sur la valeur seule de la fonction critère – on parle alors de **méthode directe** – ou si elle utilise à la fois la valeur et le gradient de la fonction critère pour décider de sa **stratégie** de recherche dans l'espace des paramètres : on parle alors de **méthode de gradient**. La **stratégie** de recherche de la méthode inclut sa **direction** de recherche – une direction peut correspondre à un déplacement suivant un paramètre par exemple -- et au **pas** de sa recherche – variation du ou des paramètres dans la direction de recherche.

I.2.2.2 Les méthodes globales

A l'opposé des méthodes locales, les méthodes globales de calage explorent une partie importante de l'espace des paramètres. Il existe différentes stratégies pour explorer l'espace des paramètres, ce qui conduit à différencier les méthodes déterministes des méthodes stochastiques et des méthodes combinatoires.

Les méthodes déterministes ne font pas d'hypothèse *a priori* sur la localisation de l'extremum pour la fonction critère. Elles consistent en une exploration intégrale de l'espace des paramètres suivant une discrétisation régulière de l'espace des paramètres.

Avec une méthode stochastique, les valeurs des paramètres testées sont tirées dans une loi de probabilité prédéfinie. Dans le cas le plus simple, la distribution est supposée uniforme : Chaque zone de l'espace a la même probabilité de contenir l'extremum.

L'avantage de ces méthodes globales est qu'elles permettent d'identifier les maxima globaux et locaux. Elles évitent ainsi le piège d'identifier un extremum local de la fonction critère. Leur principal inconvénient est qu'elles nécessitent des temps de calcul beaucoup plus importants que les méthodes locales.

Dans la pratique, on couple souvent une méthode globale avec une méthode locale : une analyse de sensibilité globale, avec un pas de balayage, permet d'identifier la ou les zones de critères optimaux. La méthode locale vient affiner la recherche, avec en entrée de la méthode les jeux identifiés comme optimaux avec la méthode globale.

I.2.3 L'évaluation de la performance

Quand on parle de la performance d'un modèle, il faut différencier :

I.2.3.1 La performance potentielle en calage :

On évalue alors les **capacités d'adaptation** du modèle sur un ou plusieurs événements. Cette performance est généralement toujours bonne et ne permet pas de différencier les modèles.

I.2.3.2 La performance en validation :

On évalue le modèle calé sur une base de données d'événements qui n'a pas servi pour le calage. Cette étape est nécessaire pour évaluer la **robustesse** du modèle qui nous intéresse dans une optique de simulation opérationnelle des crues. On peut s'intéresser à évaluer la performance du modèle sur des événements de fréquence plus rare pour tester leur capacité d'extrapolation vers les extrêmes.

I.2.3.3 La performance en transposition spatiale :

On teste un modèle calé sur un bassin donné sur un autre bassin ou un sous bassin.

I.2.3.4 La performance en prévision :

Il s'agit d'évaluer la simulation du modèle à un pas de temps $t+dt$ à partir de la connaissance de la situation du système (pluie, débits, saturation du bassin) à l'instant t .

1.2.4 Les critères de performance :

Pour l'évaluation des modélisations, différents critères mesurant la distance entre les hydrogrammes simulés et les hydrogrammes de crue reconstitués ont été calculés. Nous présentons les critères arithmétiques et quadratiques les plus couramment utilisés dans les études hydrologiques.

Équation 1 : Valeur moyenne des écarts entre deux séries, notée $e\%$

$$e\% = \sum_i \frac{(X_i - Y_i)}{N}$$

Équation 2 : Valeur moyenne des écarts absolus entre deux séries, notée $|e|\%$

$$|e|\% = \sum_i \frac{|X_i - Y_i|}{N}$$

Équation 3 : Critère EAM

L'écart arithmétique moyen : Cet indicateur mesure le biais moyen absolu entre les deux séries, normé par la moyenne des observations.

$$EAM = \frac{\sum_i |X_i - Y_i|}{\sum_i Y_i}$$

Équation 4 : Critère EQM (L'écart quadratique moyenne)

$$EQM = \frac{\sqrt{\sum_i (X_i - Y_i)^2}}{\sum_i Y_i} \cdot \sqrt{N}$$

Ce critère est la mesure de la moyenne quadratique de toutes les erreurs commises, normées par la moyenne des observations.

Équation 5 : Critère NASH (Le critère de NASH (Nash et Stedinger, 1970))

$$NASH = 1 - \frac{\sum_i (X_i - Y_i)^2}{\sum_i (Y_i - \bar{Y})^2}$$

Cet indicateur mesure la part de la variance du champ de départ Y_i expliquée par le champ simulé X_i . Pour une valeur de critère de 1, la simulation est parfaite. Pour des valeurs négatives de ce critère, la valeur moyenne de la série est un meilleur estimateur que la série des débits simulés.

Ces critères ont tous une valeur optimale atteinte si les hydrogrammes simulés coïncident parfaitement avec les hydrogrammes de crue reconstitués. Cette valeur optimale vaut 0 pour $e\%$, $|e|\%$, l'EAM et l'EQM et 1 pour le critère de NASH.

Le critère de NASH est le critère le plus fréquemment utilisé. Il a l'avantage de donner un poids important à la restitution par le modèle des forts débits. Il présente également la qualité d'être normalisé par la variance du champ observé. Son principal inconvénient est son caractère dissymétrique : il peut prendre des valeurs fortement négatives pour des événements

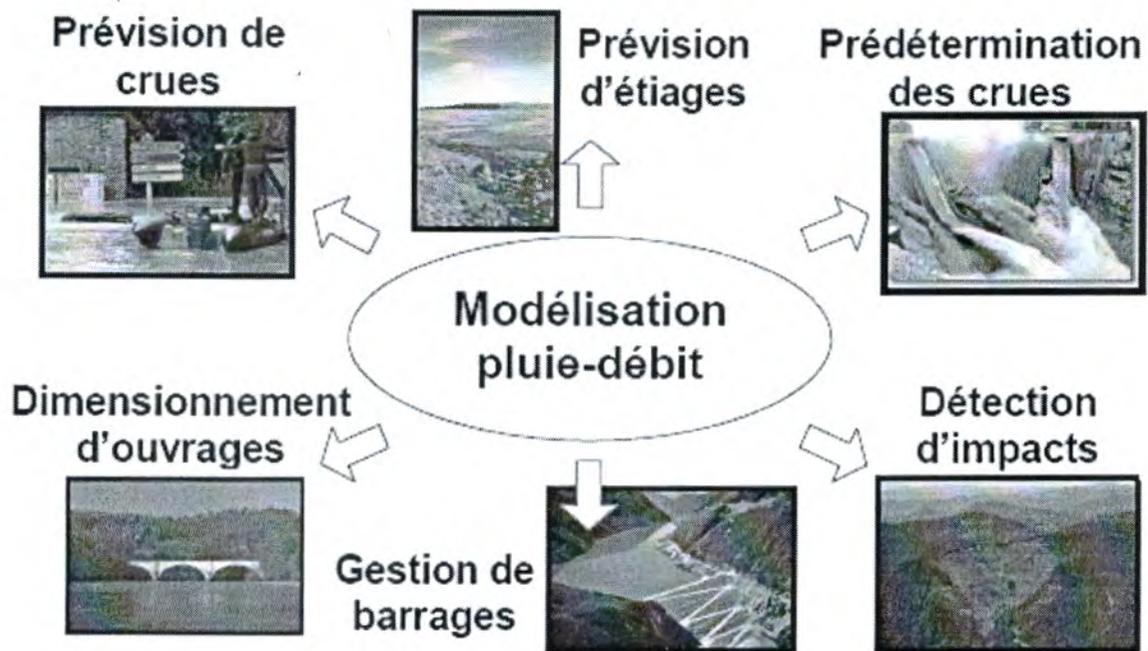


Figure 3: les différentes applications de la modélisation pluie débit (Perrin, 2000)

I-2-6 Pourquoi des modèles hydrologiques ?

Les modèles hydrologiques, sont nés bien avant l'avènement de l'informatique. A quel besoin répondaient et répondent encore ces modèles ?

La littérature scientifique présente une très grande diversité de modèles dont très peu ont trouvé une utilisation opérationnelle. La question de l'utilisation de modèles en hydrologie pour effectuer des prévisions, dimensionner des ouvrages d'art, délimiter des zones inondables – se pose en particulier pour les bassins versants pour lesquels on dispose de séries de débits mesurés. On peut distinguer trois types d'utilisation des modèles mathématiques en hydrologie.

- La modélisation comme outil de recherche : La modélisation peut être utilisée pour interpréter des données mesurées. Différents scénarios de fonctionnement hydrologique des bassins versants peuvent être confrontés aux mesures.

- La modélisation comme outil de prévision : Elle nous donne une anticipation des évolutions futures du débit d'un cours d'eau. il s'agit de l'utilisation opérationnelle la plus courante des modèles hydrologiques. Dans la plupart des cas cependant, les modèles développés sont basés sur des régressions linéaires entre les variables dépendantes (débit aval), et font peu appel aux connaissances sur les processus hydrologiques.

- La modélisation comme outil d'extrapolation : Reconstitution de séries de débits plausibles. Dans certain cas, comme par exemple le dimensionnement de déversoirs de sécurité de barrages hydroélectriques ou encore la délimitation de zone inondables dans le cadre d'un plan de prévention des risques, il est nécessaire de proposer des scénarios de crues, ou éventuellement d'étiages, de période de retour nettement supérieure à la durée d'observation des débits sur le site étudié. L'utilisation de longues séries de pluies – éventuellement générées à l'aide d'un modèle stochastique

de pluie couplées à un modèle hydrologique permet de reconstituer des scénarios rares.

La modélisation des phénomènes et comportements hydrologiques des bassins versants est incontournable dès lors qu'on s'intéresse à des problématiques relatives à la gestion des ressources en eau, à l'aménagement du territoire et aux différents risques hydrologiques (sécheresse, inondation). Cette modélisation est sensée décrire de manière fidèle et réaliste les différentes étapes liées à la transformation de la pluie en débit. Elle est sensée fournir aussi des informations sur le dimensionnement des ouvrages hydrauliques (barrages, retenues)

I-3. Les différentes approches de la modélisation :

Le terme de modèle recouvre une large variété d'outils, à la philosophie et aux objectifs différents. Les approches habituellement utilisées dans la modélisation pluie-débit apparaissent dans la figure 4. Quelques logiciels de modélisation hydrologiques seront présentés dans la section suivante, nous nous contentons de donner ici une simple définition des différentes approches.

I-3-1 Modèles stochastiques :

Compte tenu des incertitudes sur les données et quelquefois même sur les processus en jeu, une modélisation stochastique peut sembler appropriée, qu'il s'agisse de l'hydrologie ou de l'environnement.

Ainsi Jensen (1992) considère qu'une approche stochastique est un moyen rationnel de traiter la caractérisation spatiale de la variabilité, et d'établir un lien entre les incertitudes des paramètres et celles des prédictions.

Toutefois cette approche, qui semble par ailleurs le meilleur moyen de caractériser la variabilité des grandeurs, nécessite la connaissance des lois de probabilité les plus courantes pour la variabilité considérée ou au moins de leurs premier moment (Vauclin 1991)

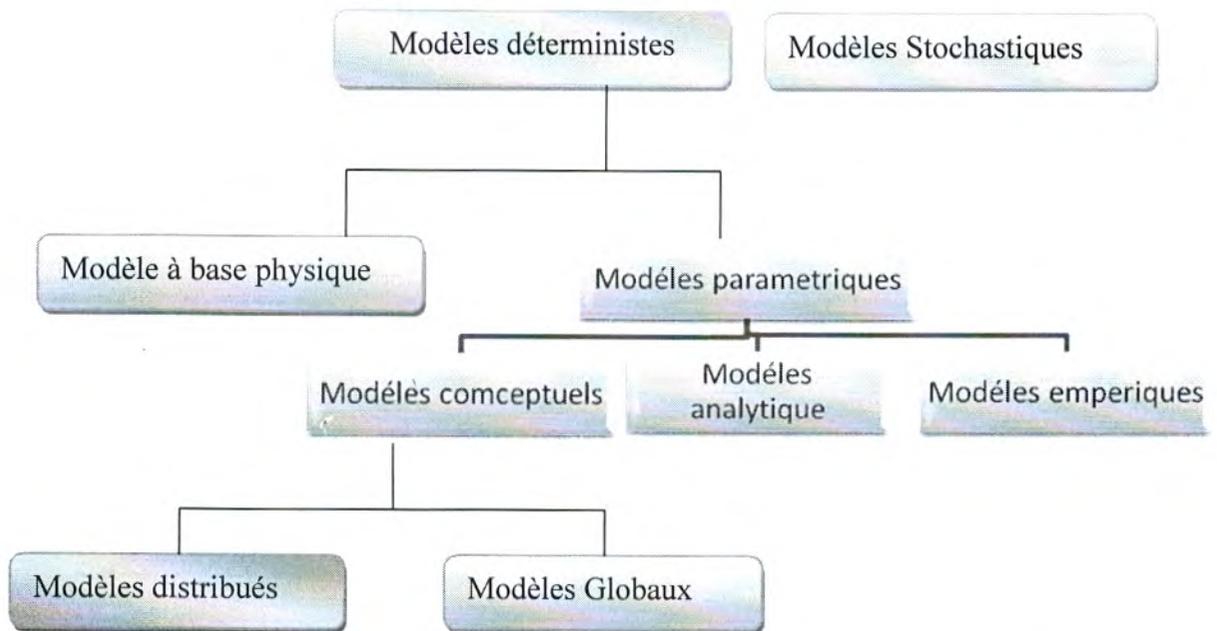


Figure 4 : les différentes approches de modélisation (Gaume ; 2002)

I-3-2 Modèles déterministes :

Un modèle est dit déterministe si aucune de ses grandeurs n'est considérée comme aléatoire. La plupart des modèles hydrologiques sont déterministes. Ces modèles associés à chaque jeu de variables de forçage (variable indépendantes d'entrée du modèle, peuvent être essentiellement des mesures de pluie), de variables d'état (variables permettant de caractériser l'état du système modélisé, par exemple : le niveau de remplissage des différents « réservoirs » d'eau du bassin versant, taux de saturation des sols, profondeur des sols etc.), une valeur de réalisation unique de variables de sortie (il s'agit essentiellement des débits simulés à l'exutoire d'un bassin versant) (Maftai 2002).

I-3-3 Modèles à base physique :

Le modèle à base physique est basé uniquement sur des équations de la physique, et ne comportant idéalement aucun paramètre. Il n'existe pas de modèle à base physique au sens stricte en hydrologie. Certains modèles comme SHE tendent à s'en rapprocher.

L'importance de l'hétérogénéité spatiale dans la réponse hydrologique des bassins versants rend cependant difficile voire impossible l'utilisation de tels modèles.

La précision spatiale des données disponibles en particulier concernant les types de sols et leurs profondeurs n'est pas suffisante. Dans la pratique, les profondeurs et les conductivités moyennes des sols représentatives de sous parties du bassin versant doivent être évaluées par calage et deviennent, de fait, des paramètres et non des données (Maison 2000)

Ce modèle d'inspiration mécaniste, a été élaboré au Danish Hydraulic Institute (DHI). MIKE SHE a pour objectif la modélisation de la partie continentale du cycle de l'eau et peut être en théorie, appliqué à des surfaces allant de la parcelle à la totalité du bassin versant. Parmi les domaines d'application de MIKE SHE, nous retrouvons l'étude classique de la dynamique du bassin versant, ainsi que le suivi des impacts relatifs aux modifications du bassin

(occupation des sols, aménagement, types des sols...), ou de scénarios climatiques (sécheresse, fortes pluies...).

Le caractère mécaniste de ce modèle provient de l'utilisation de différents modèles mathématiques pour décrire chacune des composantes du cycle hydrologique et du cycle des polluants (Maftai 2002).

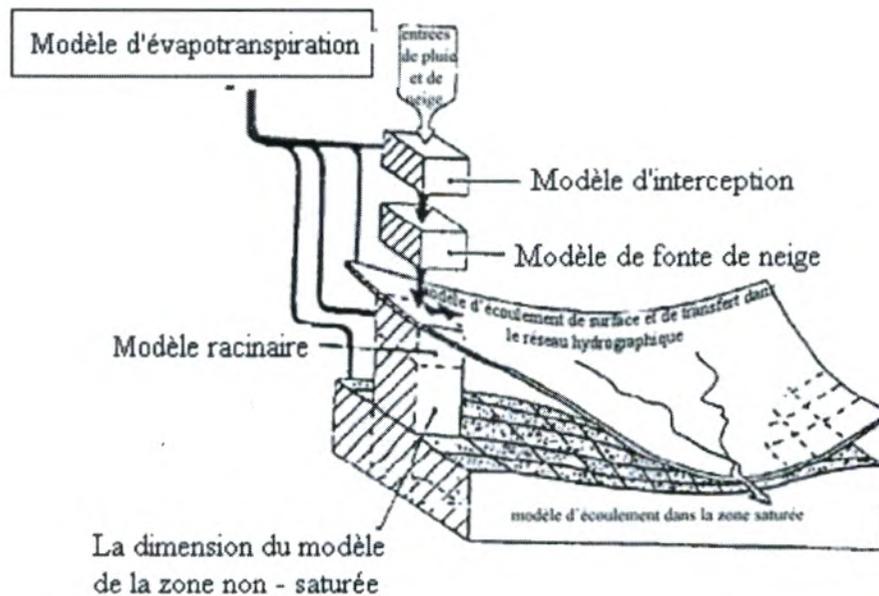


Figure 5: Structure du modèle SHE (Perrin 2000)

De ce fait, la discrétisation du bassin versant s'effectue classiquement par un découpage en strates horizontales et en colonnes homogènes tridimensionnelles. La structure de ce modèle est présentée sur la figure 5. Le tableau ci-après montre globalement les modèles utilisés dans le cadre de l'hydrodynamique.

Tableau 1: Modélisation utilisée avec modèle hydrodynamique de MIKE SHE

Interception et Evapotranspiration	Kriston et Jensen (1975)
Ecoulement en zone non saturée	Richart (1931)
Ecoulement en zone saturée	Boussineq (1904)
Ruissellement	Ondes diffusives
Ecoulement dans le réseau hydrographique	Saint Venant (1871)

Du fait du caractère fortement mathématique de ce modèle, la connaissance préalable de nombreuses données s'avère indispensable. Nous notons entre autre la pluviométrie, les températures, l'occupation des sols, le type de culture, la texture des sols, les usages des sols, la topographie.

Toutefois, MIKE SHE dispose de nombreuses bases de données intégrées, ce qui lui confère un certain intérêt car la mise en place de campagne d'acquisition n'est pas indispensable que si l'utilisateur souhaite enrichir le plus possible la modélisation. Dans un premier temps, l'utilisation des banques de données peut se révéler suffisante.

I-3-4 Modèles paramétriques :

Les modèles paramétriques sont les modèles incluant des paramètres dont la valeur doit être estimée par calage.

I-3-5 Modèles empiriques :

Le type de fonctions reliant les variables est fixé, à priori (fonction polynomiales, fonction étant fixé, le calage consiste alors à déterminer la combinaison de fonctions s'ajustant le mieux aux données mesurées. (Gaume ; 2002).

I-3-6 Modèles analytiques :

Ce sont des modèles pour les quels les relations entre les variables de sortie et les variables d'entrée ont été établies par analyse de séries de données mesurées. L'exemple type est ce lui des modèles linéaires : les paramètres de ces modèles sont liés aux coefficients de corrélation entre les variables.

Notons que l'analyse des données peut conduire au choix de relations non linéaires entre les variables (Gaume2002).

I-3-7 modèles conceptuels : ou « modèle conceptuel à réservoir».

Ce type de modèle repose sur l'analogie remarquée entre le fonctionnement d'un bassin versant et un ensemble de réservoirs interconnectés. Plus précisément, quand la structure du système et des lois le régissant sont inconnues ou lorsque la pauvreté des informations et la complexité des phénomènes en jeu prévalent, le comportement du système en question est simplifié.

Ainsi, les modèles conceptuels intègrent des facteurs complexes en essayant de décrire le concept physique du comportement du système par une représentation plus simple. A travers ce type de modélisation, sont construites des structures empiriques censées reproduire les sorties du système étudié (débit, concentration,) à partir des variables d'entrée (pluie, évapotranspiration, fertilisation, pratique agricoles).

Ce type de modèle reproduit donc au mieux le comportement d'un système, plutôt qu'il n'avance d'explications causales sur son comportement .le modèle CEQUEAU (G. Morin 1991) est un parfait exemple de modèle conceptuel que nous présenterons dans le schéma suivant.

Le modèle hydrologique CEQUEAU, développé à l'Institut National de la Recherche Scientifique-Eau (INRS-Eau) depuis 1971, est un modèle déterministe distribué à bilan, qui prend en compte les caractéristiques physiques du bassin versant par le découpage de celui-ci en éléments de même dimension. Cette discrétisation spatiale du bassin versant permet de suivre l'évolution spatio-temporelle des phénomènes, de prévoir l'effet de toute modification physique du bassin versant et de prendre en compte des réservoirs réels ou fictifs.

Le découpage dans l'espace d'un bassin versant peut être très varié dans sa forme et sa densité. Pour le modèle CEQUEAU, le bassin versant est découpé en surfaces carrées de dimensions semblables appelées « carreaux entiers » c'est le premier découpage. Un deuxième est ensuite nécessaire pour reproduire le cheminement de l'eau entre les carreaux

entiers et vers la rivière. Ceci se fait en subdivisant chaque carreau entier en « carreaux partiels » à l'aide des lignes de partage des eaux (G. Morin 1991):

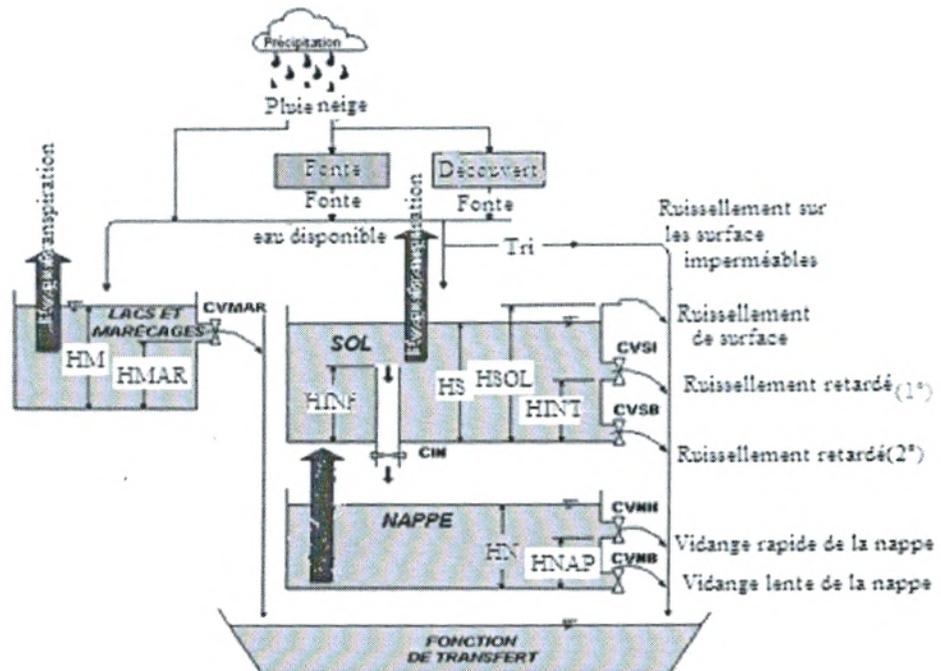


Figure 6 : La fonction de production du modèle hydrologique CEQUEAU (G. Morin 1991)

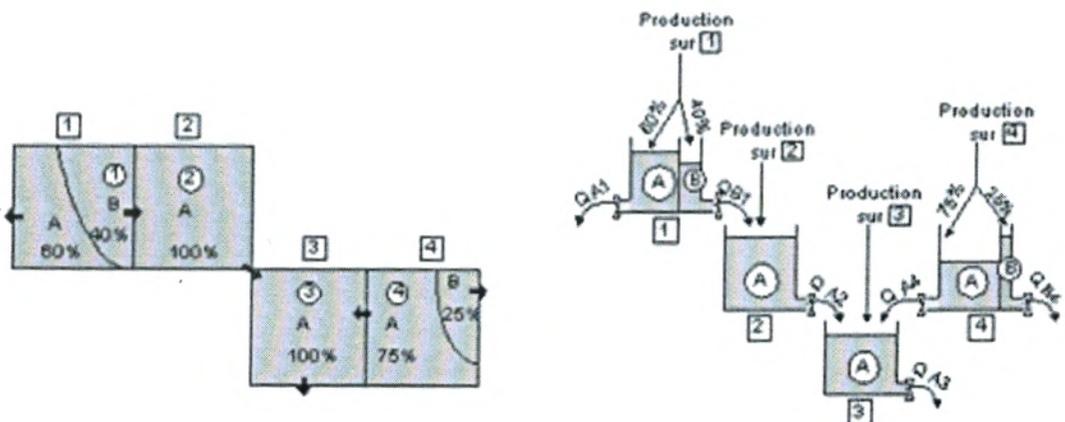


Figure 7 : La fonction de transfert du modèle CEQUEAU (G. Morin 1991)

- Le premier découpage délimite le bassin versant en surfaces élémentaires que nous appellerons "carreaux entiers". La dimension à donner aux "carreaux entiers" dépend principalement de la superficie du bassin versant étudié, des données météorologiques disponibles, de la topographie du terrain, etc. Les données physiographiques nécessaires pour chaque "carreau entier" sont l'altitude, les pourcentages de forêts, de lacs et de

marais. Ces données sont déterminées à partir des cartes topographiques du bassin versant étudié ou à l'aide d'un système d'information géographique.

- Le deuxième découpage consiste à subdiviser les carreaux entiers en carreaux partiels. Ces éléments sont le résultat de la subdivision des "carreaux entiers" en fonction des lignes de partage des eaux. On compte jusqu'à quatre "carreaux partiels" par "carreau entier". Les données nécessaires pour ces éléments partiels sont : Le sens d'écoulement de l'eau et son pourcentage de superficie par rapport au "carreau entier" qu'il subdivise.

Le modèle compte deux parties principales visant à décrire le mieux possible l'écoulement de l'eau vers l'exutoire du bassin versant. La première partie concerne l'écoulement vertical de l'eau appelée fonction de production qui transforme les précipitations réelles en précipitations utiles sur chaque carreau entier et à chaque pas du temps.

La schématisation de ce processus est représentée par un ensemble de réservoirs communiquant entre eux à l'aide de relations mathématiques reproduisant, à l'échelle du pas de temps de la simulation, les différents transferts de masse (figure 6). Et la deuxième partie concerne le transfert de l'écoulement dans le réseau de drainage appelé fonction de transfert qui assure le cheminement de l'eau entre les carreaux partiels (figure 7).

I-3-8 modèles globaux :

Les modèles globaux offrent à l'utilisateur un choix très attractif, car il présente une structure très simplifiée, il ne demande pas trop de données, faciles à utiliser et à calibrer. La représentation du processus hydrologique est très simplifiée. Il peut souvent mener à des résultats satisfaisants, et spécialement si l'objectif majeur est la prévision d'une crue.

Un exemple de ce type de modèle est le modèle **GR (génie rural) (CEMAGRAF)** que nous allons utiliser dans notre étude. C'est un modèle à réservoir, il fonctionne pour différents pas de temps annuel GR1A, mensuel GR2M et journalier GR4J,

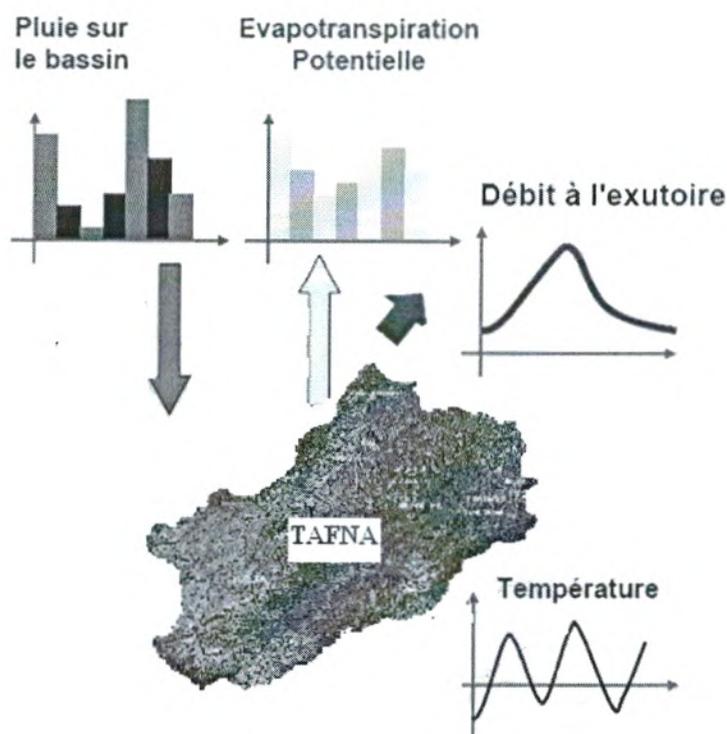


Figure 8 : modèle hydrologique GR

I-3-9 Modèle Spatialisés

Actuellement plusieurs modèles spatialisés correspondant à des différentes écoles hydrologiques sont en phase avancée de développement. En principe, les modèles spatialisés sont des modèles qui utilisent des entrées et des sorties ou les caractéristiques des bassins versants sont distribuées dans l'espace. La spatialisation peut être arbitraire ou basée sur des divisions morphologiques naturelles (découpage en sous bassins) ou hydrologique (aires contributives).

I.3.10 Modèle physique-conceptuel semi-spatialisé (TOPMODEL)

TOPMODEL est un modèle semi-distribué destiné à reproduire le comportement hydromorphologique d'un bassin versant. Ce modèle est encore utilisé et amélioré car sa relative simplicité et les bons résultats qu'il fournit sont autant de motivations à son développement. Ce modèle prédit, à chaque pas du temps, la distribution spatiale du contenu en eau au sein des différentes mailles du modèle numérique de terrain (MNT) du bassin versant considéré. Il est basé sur les concepts originaux de déficit en eau du sol par rapport à la saturation et à l'index topographique.

Cette idée provient du fait que, depuis quelques années, la participation des écoulements souterrains aux variations des débits des rivières, même en période de fortes précipitations a été reconnue comme étant capitale (Maison.2000).

L'index topographique est utilisé pour déterminer, en fonction de la topographie du bassin, la quantité d'eau destinée au ruissellement et celle restant pour l'infiltration. La structure de ce modèle est illustrée sur la figure 9.

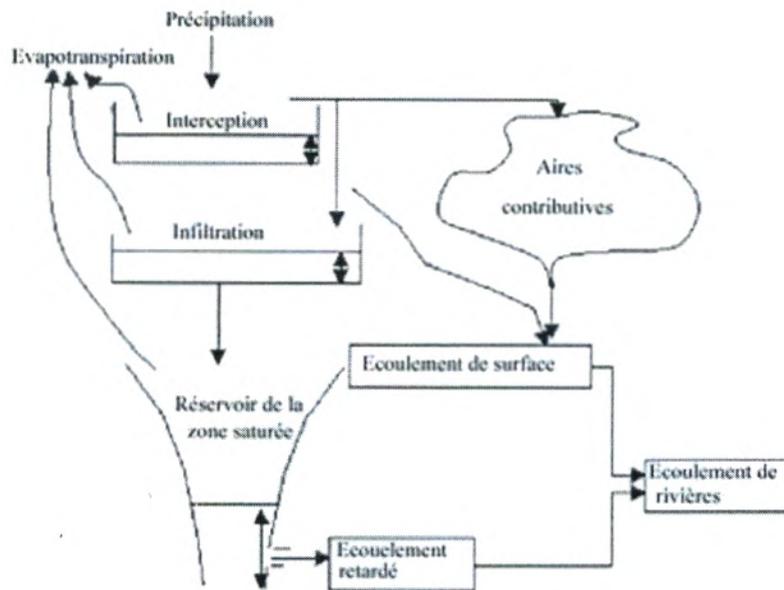


Figure 9: Structure du modèle TOPMODEL (Henine 2005)

I.3.11 Les modèles neuronaux :

Les modèles neuronaux sont donc le fruit des sciences de la cognition et de l'intelligence artificielle. Ils ont d'abord été utilisés dans des domaines connexes (reconnaissance d'images, de caractères, de voix...), avant que leur champ d'application ne s'élargisse (automatique, sciences de la terre...). Cependant, même lorsqu'ils sont employés dans d'autres domaines, les réseaux de neurones restent une branche à part de la modélisation mathématique possédant son vocabulaire et ses paradigmes spécifiques hérités des sciences de la cognition.

Ce qui est généralement appelé calage, optimisation et inversion, prend le nom d'apprentissage ou de rétropropagation. De même, la notion de parcimonie est quasiment absente des travaux sur les réseaux de neurones comme nous le verrons par la suite. Les réseaux possédant de nombreux paramètres de calage ne sont généralement pas considérés comme sur-paramétrés. Leurs moins bonnes performances en validation sont attribuées à un sur calage sur le jeu de données d'apprentissage (over-training).

* Le neurone :

Un neurone est une unité de calcul élémentaire qui comporte n données d'entrée (x_1, x_2, \dots, x_n) et qui renvoie une donnée de sortie unique y dépendant des valeurs des données d'entrée. Le neurone effectue deux opérations sur ces données d'entrée :

- 1) une combinaison linéaire suivie
- 2) d'une transformation non linéaire. Ceci peut s'exprimer sous la forme suivante :

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n) = A \left[w_0 + \sum_{i=1}^n (w_i \cdot x_i) \right]$$

où w_i correspond aux « poids » du neurone (weights), et A est une fonction dite « fonction d'activation ».

La fonction d'activation est généralement non linéaire. Dans le cas où cette fonction est linéaire, on retrouve le modèle linéaire. La fonction d'activation la plus souvent retenue dans les études précédentes est la fonction dite sigmoïde :

$$y = A(x) = \frac{1}{(1 + e^{-x})}$$

On note que la fonction sigmoïde (figure 10) renvoie des valeurs comprises dans l'intervalle $[0, 1]$. Il est donc nécessaire de transformer cette donnée de sortie pour que le réseau de neurones puisse générer des valeurs non limitées à cet intervalle. C'est le rôle de la couche de sortie du réseau de neurones.

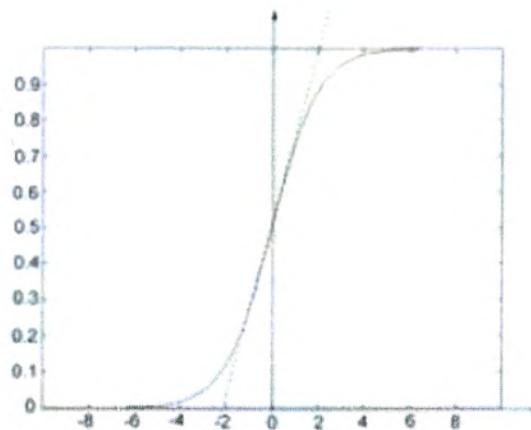


Figure 10 : La fonction sigmoïde (ou logistique), quasi linéaire sur l'intervalle $[-1, 1]$ (Gosset. 2000).

*Le perceptron :

Les neurones sont organisés en réseau. Le perceptron, premier type de réseau proposé et encore très largement utilisé, est composé de trois couches (figure I.11) :

— Une couche de neurones d'entrée (input layer) qui contient autant de neurones que de variables de forçage ou d'entrée prises en compte. Les neurones de cette couche n'ont qu'une donnée en entrée et une donnée en sortie. Ils réalisent essentiellement une normalisation de ces données d'entrée afin qu'elles prennent des valeurs dans des gammes comparables : typiquement dans l'intervalle $[0, 1]$ ou $[-1, 1]$.

- Une couche de neurones dite « couche cachée » (hidden layer) dont le fonctionnement

vient d'être décrit. Chaque neurone de la couche cachée a pour données d'entrée toutes les sorties des neurones de la couche d'entrée.

- Une couche de neurones de sortie (output layer), qui réalise généralement une combinaison

linéaire des sorties des neurones de la couche cachée. La couche de sortie comporte autant de neurones que de données de sortie, généralement 1. Notons ici que, si la fonction

d'activation des neurones de la couche cachée est la fonction sigmoïde et le neurone de la couche de sortie est linéaire, alors la donnée de sortie du réseau est nécessairement bornée. Ceci peut poser un problème lorsque le réseau simule des données non bornées. Il peut ne pas être en mesure de simuler des valeurs nettement supérieures aux valeurs présentes dans l'échantillon de données utilisé pour le calage du réseau de neurones.

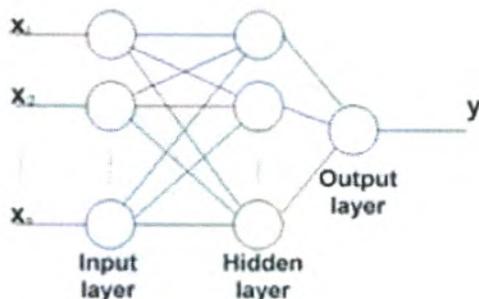


Figure 11 : Perceptron à n entrées et une sortie (Gosset, 2000)

I.3.12 Conclusion

Compte tenu de cette étude des modèles analysés, notre choix s'est porté sur un modèle hydrologique qui traite la modélisation des écoulements dans les régions arides et semi-arides, avec un intérêt particulier sur la gestion et l'exploitation rationnelle des ressources en eau, il s'agit du modèle hydrologique du Génie Rural (GR). En effet, notre choix de simuler le comportement d'un bassin versant avec le modèle GR, est justifié pour les raisons suivantes :

- Le modèle GR est un modèle complet et simple, donc adapté théoriquement à n'importe quel type de climat et notamment à celui des zones arides ; en plus ce modèle a la capacité de simuler aussi bien les pertes, l'écoulement de surfaces et l'écoulement souterrain.
- La fiabilité des résultats obtenus lors de son application à des sous bassins versants méditerranéens nous a encouragé à appliquer ce modèle.

Aussi, dans ce qui suit, nous allons présenter assez exhaustivement le modèle du Génie Rural (GR), que nous appliqueront sur les données de trois importants sous bassins de la Tafna.

I.4 Le Modèle GR

Les modèles de simulation du Génie Rural fonctionnent aux pas de temps annuel, mensuel et journalier.

I.4.1 Objectifs de développement :

La simulation du débit à l'exutoire d'un bassin versant est nécessaire voir indispensable pour de nombreuses applications d'ingénierie et de gestion de la ressource en eau, telles que le dimensionnement et la gestion d'ouvrages, la prévision des crues ou des étiages, la détection d'impact, etc. C'est pour répondre à ces questions que le Cemagref a commencé à développer

au début des années 1980 des modèles hydrologiques (du Génie Rural – GR) permettant de faire le lien entre la lame d'eau précipitée sur un bassin versant et son débit à l'exutoire (Michel 1983). Au-delà de leur aspect pratique, ces modèles ont soulevé des questions essentielles sur la façon de représenter la transformation de la pluie en débit à l'échelle du bassin versant.

I.4.2 Mode de développement :

Bien que ces modèles soient parfois apparentés à des modèles conceptuels du fait de leur structure à réservoirs, ce sont en fait des modèles empiriques: leur construction s'est faite sur la base de grands jeux de données et en découvrant progressivement la structure permettant de reproduire au mieux le comportement hydrologique du bassin versant (c'est-à-dire sa réponse aux pluies).

Les idées suivantes se sont progressivement imposées au cours du développement de ces modèles pour permettre d'obtenir des modèles fiables et robustes (Mathevet 2005):

- Représentation globale du bassin versant,
- Approche empirique de développement sans recours a priori à la physique des écoulements,
- Augmentation progressive de la complexité de la structure du modèle en partant de structures simples,
- Justification de la complexité de la structure d'un modèle par ses performances,
- Recherche de structures de modèle générales (applicables à des bassins variés),
- Utilisation de larges échantillons de bassins versants pour tester les performances des modèles,
- Évaluation d'un modèle par comparaison à d'autres structures de modèle,

I.4.3 Description du modèle pluie-débit annuel GR1A :

I.4.3.1 Introduction :

Le modèle GR1A (modèle du Génie Rural à 1 paramètre Annuel) est un modèle pluie-débit global à un seul paramètre. Son développement a été initié au Cemagref à la fin des années 1990, avec pour objectif de mettre au point un modèle de simulation pluie-débit robuste et fiable en vue de l'utiliser pour des applications d'évaluation et de gestion de la ressource en eau. La principale version, que nous présentons ici, est celle proposée par Mouelhi (2003) et Mouelhi *et al.* (2006a).

I.4.3.2 Description mathématique :

La structure du modèle est très simple puisqu'elle se résume à une simple équation, le débit Q_k de l'année k étant proportionnelle à la pluie P_k de la même année, avec un coefficient d'écoulement dépendant de P_k , de la pluie P_{k-1} de l'année $k-1$ et de l'évapotranspiration potentielle annuelle moyenne E . Le modèle s'écrit :

$$Q_x = P_x \left\{ 1 - \frac{1}{\left[1 + \left(\frac{0.7P_x + 0.3P_{x-1}}{X.E} \right)^2 \right]^{0.5}} \right\} \quad \text{Eq. 1}$$

Où X est l'unique paramètre du modèle.

Cette formule dérive de la formule de Turc (1955), qui donne l'écoulement moyen interannuel. Une recherche systématique de la meilleure manière de prendre en compte l'état antérieur du système a montré que l'on devait se limiter à prendre en compte la pluie de l'année précédant l'année en cours. Le paramètre X traduit l'influence d'une ouverture du bassin sur l'extérieur non atmosphérique (par exemple échange avec des nappes profondes ou avec des bassins adjacents dans le cas d'une non-superposition des limites topographiques et géologiques) : si X est supérieur à 1, le système perd de l'eau et si X est plus petit que 1, le système en gagne, le tout exprimé en fraction de l'ETP.

I.4.3.3 Paramètre :

Le modèle ne comporte qu'un paramètre optimisable, le paramètre X adimensionnel, qui apparaît comme un coefficient modulateur de l'évapotranspiration potentielle. Sur un large échantillon de bassins versants, la médiane de X vaut 0.7 et un intervalle de confiance à 90% est donné par [0.13 ; 3.5].

I.4.4 Description du modèle pluie-débit mensuel GR2M :

I.4.4.1 Introduction :

Le modèle GR2M (modèle du Génie Rural à 2 paramètres Mensuel) est un modèle pluie-débit global à deux paramètres. Son développement a été initié au Cemagref à la fin des années 1980, avec des objectifs d'applications dans le domaine des ressources en eau et des étiages.

Ce modèle a connu plusieurs versions, proposées successivement par Kabouya (1990), Kabouya et Michel (1991), Makhlof (1994), Makhlof et Michel (1994), Mouelhi (2003) et Mouelhi *et al.* (2006b), qui a permis d'améliorer progressivement les performances du modèle. La version présentée ici est celle de Mouelhi *et al.* (2006b) qui paraît la plus performante.

Sa structure, bien qu'empirique, l'apparente à des modèles conceptuels à réservoirs, avec une procédure de suivi de l'état d'humidité du bassin qui semble être le meilleur moyen de tenir compte des conditions antérieures et d'assurer un fonctionnement en continu du modèle. Sa structure associe un réservoir de production et un réservoir de routage ainsi qu'une ouverture sur l'extérieur autre que le milieu atmosphérique. Ces trois fonctions permettent de simuler le comportement hydrologique du bassin.

I.4.4.2 Description mathématique :

Un schéma de la structure est donné à la Figure 12. P_k est la pluie mensuelle du mois k et E l'évapotranspiration potentielle moyenne pour le même mois calendaire. Les équations qui régissent le modèle sont les suivantes:

• Production

La fonction de production du modèle repose sur un réservoir de suivi d'humidité du sol. Une partie P_s de la pluie P_k va être ajoutée au contenu S_k dans le réservoir en début de pas de temps :

$$P_s = \frac{X_1 \left(1 - \left(\frac{S_k}{X_1} \right)^2 \right) \cdot \tanh \left(\frac{P_k}{X_1} \right)}{1 + \frac{S_k}{X_1} \cdot \tanh \left(\frac{P_k}{X_1} \right)} \quad \text{Eq. 2}$$

Le paramètre X_1 , capacité du réservoir, est positif et exprimé en mm. La pluie en excès, P_1 , est donnée par :

$$P_1 = P - P_s' \quad \text{Eq. 3}$$

Et le contenu du réservoir est actualisé :

$$S' = S_k + P_s \quad \text{Eq. 4}$$

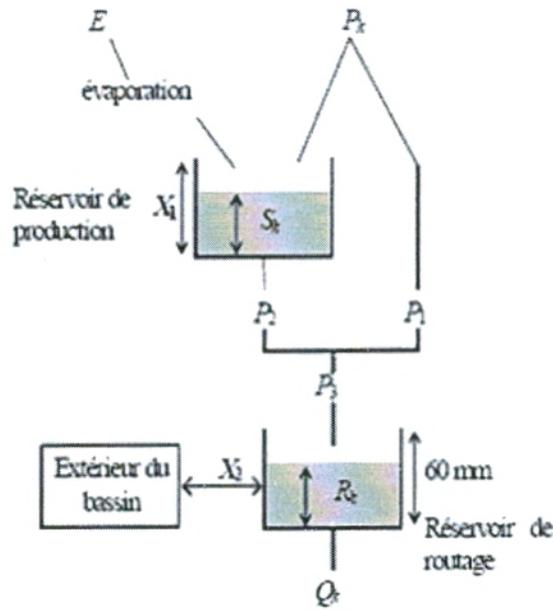


Figure 12 : Schéma de la structure du modèle GR2M

Du fait de l'évapotranspiration, une quantité E_s est prélevée du réservoir :

$$E_s = \frac{S' \left(2 - \frac{S'}{X_1} \right) \cdot \tanh \left(\frac{E}{X_1} \right)}{1 + \left(1 - \frac{S'}{X_1} \right) \cdot \tanh \left(\frac{E}{X_1} \right)} \quad \text{Eq. 5}$$

E est l'évapotranspiration potentielle moyenne du mois calendaire considéré. Le niveau S' devient S'' :

$$S'' = S' - E_s \quad \text{Eq. 6}$$

• Percolation

Le réservoir de suivi d'humidité du sol se vidange ensuite selon une percolation P_2 :

$$P_2 = S'' \cdot \left\{ 1 - \left[1 + \left(\frac{S''}{X_1} \right)^3 \right]^{-1/3} \right\} \quad \text{Eq. 7}$$

Et son niveau S_{k+1} , prêt pour les calculs du mois suivant, est alors donné par :

$$S_{k+1} = S'' - P_2 \quad \text{Eq. 8}$$

• Routage et échange avec l'extérieur non atmosphérique

La quantité d'eau totale P_3 qui atteint le réservoir de routage est donnée par :

$$P_3 = P_1 + P_2 \quad \text{Eq. 9}$$

Le niveau R_k dans le réservoir devient alors R' :

$$R' = R_k + P_3 \quad \text{Eq. 10}$$

Un terme d'échange en eau souterraine F a été imposé par les données des nombreux bassins utilisés. Ignorer cette ouverture sur l'extérieur non atmosphérique conduit à une baisse considérable de l'efficacité du modèle. F est alors calculé par :

$$F = (X_1 - 1) R' \quad \text{Eq. 11}$$

Le paramètre X_2 est positif et adimensionnel. Le niveau dans le réservoir devient :

$$R'' = X_1 R' \quad \text{Eq. 12}$$

Le réservoir, de capacité fixe égale à 60mm, se vidange pour donner le débit Q_k selon l'équation suivante:

$$Q_k = \frac{R''^2}{R'' + 60} \quad \text{Eq. 13}$$

Le contenu du réservoir est enfin actualisé par :

$$R_{k+1} = R'' - Q_k \quad \text{Eq. 14}$$

1.4.4.3 Paramètres :

Le modèle a deux paramètres optimisables :

X_1 : capacité du réservoir de production (mm)

X_2 : coefficient d'échanges souterrains (-)

Sur un large échantillon de bassins versants, (Perrin, Michel, Andrésian, 2003) on obtient les valeurs données dans le Tableau 2.

Tableau 2 : Valeur des paramètres du modèle GR2M obtenues sur un large échantillon de bassins versants

Paramètre	Médiane	Intervalle de confiance à 90%
$X_1(\text{mm})$	380	140 - 2640
$X_2(-)$	0.92	0.21 - 1.31

1.5 Applications des modèles :

Les modèles présentés précédemment peuvent être utilisés pour un certain nombre d'application d'ingénierie ou de gestion de l'eau. A titre d'exemples, on peut citer :

- la reconstitution ou l'extension de séries de débit : après calage, le modèle est appliqué en simulation sur une période sur laquelle on dispose de données pluviométriques observées ;

- la prédétermination : les séries de débit observé étant souvent courte, il peut être intéressant de les étendre à l'aide d'un modèle pluie-débit. On peut pour cela soit utiliser des séries de pluie observée si elles sont suffisamment longues, soit utiliser un générateur stochastique de pluie qui permettra d'obtenir des séries probables de pluie sur le bassin (un tel générateur demandant un calage préalable sur des séries de pluie observée) ;

- la prévision à court terme (quelques heures à quelques jours) : elle est particulièrement utile pour les événements de crues. Le modèle doit alors intégrer une procédure d'assimilation des débits observés, ce qui permet d'améliorer de façon substantielle les prévisions. Les travaux de Tangara (2005) ont par exemple permis de mettre au point un modèle continu (GR3P) dérivant du modèle GR4J et spécifiquement adapté à l'exercice de prévision à court terme ; voir également les travaux réalisés en mode événementiel avec le modèle GR3H (Fourmigué et Lavabre, 2005) ;

- la prévision à moyen ou long terme (de quelques semaines à quelques mois) : elle est intéressante pour les problématiques d'étiage et de gestion de la ressource. Dans ce cas, se pose le problème de l'incertitude sur les pluies futures. Pour en tenir compte, on doit adopter un cadre de prévision probabiliste en utilisant de nombreux scénarios de pluie future à partir de l'instant de prévision, scénarios issus soit de prévisions d'ensemble de modèle météorologiques, soit d'archives météorologiques si elles existent, soit d'un générateur stochastique de pluie ;

- la détection de tendance dans le comportement hydrologique du bassin versant : l'utilisation d'un modèle hydrologique permet d'identifier dans la variabilité des séries de débit ce qui vient de la variabilité naturelle des conditions climatiques de ce qui vient de changements de caractéristiques du bassin versant (Andréassian, 2002; Andréassian *et al.* 2003) ;

- la gestion ou le dimensionnement d'ouvrages : grâce au modèle, on peut dans une étude de dimensionnement simuler en continu des apports au réservoir et ainsi optimiser son dimensionnement pour des objectifs particuliers (soutien d'étiage, écrêtement de crue, etc.) en tenant compte ainsi de la variabilité naturelle de ces apports. En conditions opérationnelles, la prévision des apports peut permettre en mieux gérer l'ouvrage (Yang *et al.* 1991).

1.6 Conclusions et perspectives :

Les modèles du Génie Rural du fait de leur construction, ne peuvent être que parcimonieux (peu de paramètres à caler). Par suite, ils ont des besoins en données limités, dans un domaine où les modèles tendent à devenir de plus en plus complexes pour intégrer

des processus supposés exister à l'échelle ponctuelle. Cette simplicité, si elle n'est pas un objectif en soit, s'est imposée au cours de leur développement parce que de nombreuses hypothèses de fonctionnement, empruntées à l'arsenal des modèles conceptuels, étaient rejetées par des données

Observées lorsque de nombreux bassins étaient pris en compte et que le test en calage-contrôle était appliqué avec rigueur. C'est ainsi par exemple que les sous modèles classiques d'infiltration n'ont pu être retenus dans les architectures finales. Notons également que les fonctions d'échanges vers l'extérieur non atmosphérique du bassin, absentes de la grande majorité des modèles conceptuels, sont apparues comme indispensables à tous les pas de temps. Comme tous les modèles hydrologiques actuels, ces modèles restent perfectibles, malgré les efforts déjà consentis pour les rendre aussi performants que possible. Les recherches continuent donc pour les faire progresser et améliorer ainsi la compréhension du fonctionnement hydrologique du bassin versant.

CHAPITRE II

PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE

II -1 : Présentation de la zone d'étude

Le bassin versant de la Tafna, situé au Nord Ouest du territoire algérien (fig.1), s'étend sur la totalité de la wilaya de Tlemcen sur une superficie de 7245 km². Selon la nouvelle structuration des unités Hydrologiques en Algérie, le bassin versant de la Tafna appartient à l'ensemble de l'Oranie –Chott Chergui (figure 13).

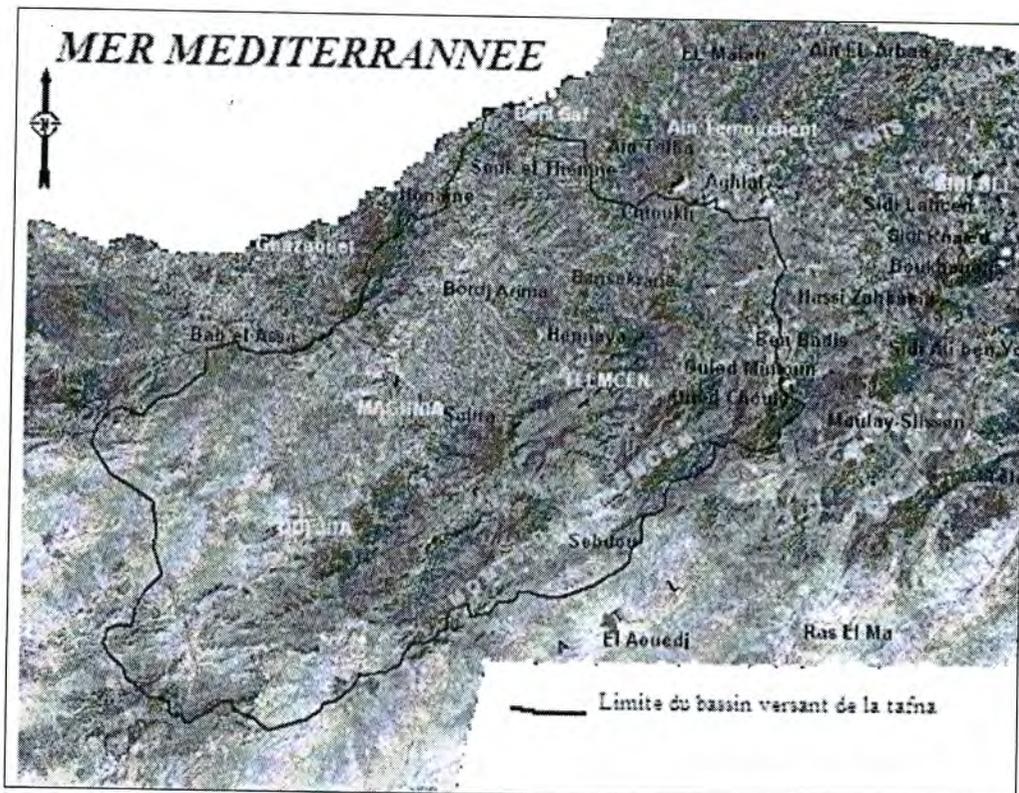


Figure 13 : Délimitation du bassin versant de l'Oued Tafna (Google, Earth).

Globalement, le bassin versant peut être subdivisé en trois grandes parties (figure 14) :

- partie orientale avec comme principaux affluents l'oued Isser et l'oued Sikkak),
- partie occidentale comprenant la Haute Tafna (oued Sebdo et oued Khemis) et l'oued Mouilah
- partie septentrionale : qui débute pratiquement du village Tafna et s'étend jusqu'à la plage de Rachgoune, embouchure de la Tafna sur la mer. Les oueds Boukiou, Boumessaoud et Zitoun sont les principaux affluents de cette partie.

Les plaines du bassin de la Tafna s'étendent aux pieds des monts de Tlemcen en avant des massifs de Traras et du Tessala, elles sont entourées de massifs aux reliefs élevés dessinant un édifice régulier formé essentiellement de terrains mésozoïques et cénozoïques.

Les monts des Traras au Nord Ouest dressent une barrière entre le bassin et la mer, ils correspondent à une série de crêtes de direction NE – SW culminant à 1136 m au djebel Fillaoucène.

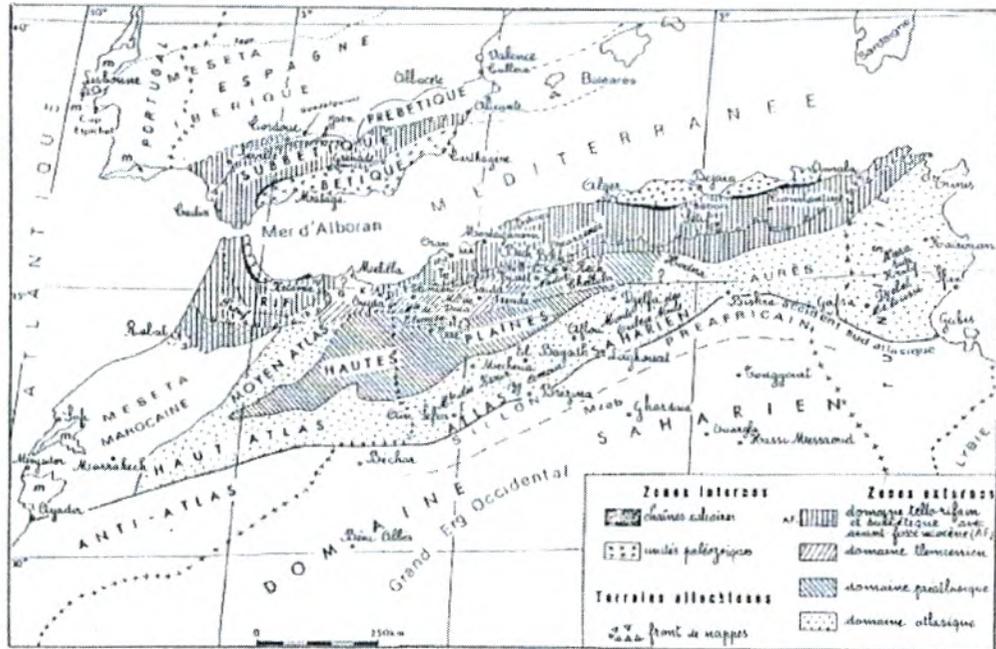
L'oued Tafna est un cours d'eau de 170 Km de long, il prend sa source dans les Monts de Tlemcen. Le cours de cet oued peut se subdiviser en trois parties : la haute Tafna, la moyenne Tafna et la basse Tafna.

- le massif des Traras comprenant la chaîne des Fillaoucène qui s'étend vers l'Ouest par le massif des Béni-Snassen.

- les monts de Tlemcen dessinant la bordure sud du bassin et s'interposent entre deux domaines bien définis :

- le domaine des nappes du Tell au Nord,
- le domaine stable des hautes plaines oranaises au Sud.

La terminaison occidentale des monts de Tlemcen qui s'élève graduellement du Nord vers le Sud est occupée par un massif montagneux représenté par les monts de Rhar-Roubane.



Bech, Brechtout ; B Rh. Bou Rhablou ; Dj. F. Djebel Fillaoucène ; G. Chaîne du Gouch ; HZ. Hraï Zerga ; RZ. Zone saharienne ; K. Kabdana ; MA. Monts d'Arzew ; Mu. Djebel Mardjadj ; Bech. Djebel Boucraja ; Lar. Djebel Taourza ; Te. Monts de Tessila ; m. Mesozoïque du Portugal et du Maroc atlantique comportant du Jurassique supérieur et du Crétacé basal.

Figure 15 : Schéma structurale de la chaîne alpine de la Méditerranée occidentale (Benest, 1985)

II.2.2 La série lithostratigraphique :

Le grand bassin de la Tafna est caractérisé par une géologie très complexe et qualifiée de grande tectonique. L'évolution des terrains rencontrés va du Primaire au Plio-Quaternaire (Figure 16).

II.2.2.1 Primaire :

Il affleure dans le bassin de l'oued Mouilah au niveau des Monts de Ghar roubane à l'ouest et les Fillaoucène à l'Est. Il est représenté par :

a)- formations schisto-quartziques :

D'âge silurien à dévonien, il s'agit de formations fortement plissées recouvrant une grande surface. A Rhar-Roubane et djebel Fillaoucène, les schistes sont alternés avec des quartzites très compacts en bans décimétriques.

b)- granite :

Le massif granitique est situé immédiatement au NE de la ville de Nedroma. Il est de forme elliptique et de couleur blanchâtre à rosâtre.

c)- auréole de métamorphisme :

L'intrusion granitique développe une auréole de métamorphisme dans la formation schistoquartzique. On y trouve des cornéennes, des schistes à andalousites et des schistes tachetés.

II.2.2.2 Secondaire :

Il occupe une grande partie de nos bassins versants étudiés et forme l'essentiel des monts de Tlemcen. La série lithostratigraphique schématisée par le log de la figure 11 est représentée par :

a)- Trias :

Localisé essentiellement au Nord d'Aïn Tellout et au niveau de Béni-Bahdel et à l'Est dans le bassin d'oued Mouilah. Il est constitué par des argiles plus ou moins dolomitiques et gypseuses et des marnes bariolées fortement teintées.

b)- Le Jurassique :

i) *Les argiles de Saïda :*

Elles correspondent à des dépôts argileux et marneux, parfois schisteux à passées gréseuses. La formation peut atteindre 300 m jusqu'à 500 m est attribuée au *Callovo-Oxfordien*, elle offre parfois une transition assez progressive aux grès de Boumediene.

ii) *Les grès de Boumediene :*

D'âge *Oxfordien supérieur-Kimméridgien inférieur*, il s'agit d'un ensemble à dominance gréseuse, avec des passées argileuses masquées le plus souvent, par des éboulis ou la végétation. Ces grès à ciment calcaire, se présentent en bancs assez durs, dont les épaisseurs sont variables pouvant atteindre 500 m.

Les grès de Boumediene sont particulièrement développés dans les forêts de Zarifet et de Hafir au SW de Terny et au niveau des cascades d'El Ourit au Sud du bassin d'oued Sikkak.

i) *Les calcaires de Zarifet :*

Il s'agit de bancs calcaires séparés par de minces intercalations de calcaires marneux écaillés, parfois quelque peu fossilifères, marquant presque partout la base très nette du Kimméridgien et reposent directement en concordance sur les grès de Boumediene formant les falaises des environs de Tlemcen. L'épaisseur de cette formation peut atteindre 25 m au col de Zarifet.

i) *Dolomies de Tlemcen :*

D'âge *Kimméridgien moyen-Kimméridgien supérieur*, il s'agit de dolomies cristallines grises, avec de nombreuses cavités remplies de calcite. Elles affleurent autour d'Aïn Fezza, dans la forêt de Zarifet, au Nord de Tlemcen, dans les djebels Teffatisset, Aïn El Hout et sur le plateau de Terny. Elles peuvent être surmontées par les calcaires de Stah épargnées par la dolomitisation. Cette formation peut atteindre 200 m aux environs de Tlemcen à El Ourit et on la rencontre dans tous les sous-bassins étudiés.

i) *Marno-calcaires de Raourai :*

Ce sont des marnes grises, blanchâtres en surface, intercalées de nombreux lits et bancs de calcaires marneux durs. Cette formation est limitée à sa base par les lits calcaires de Stah et au Sommet par les calcaires de Lato, ou les premières assises des dolomies de Terny. Elle affleure Particulièrement sur le plateau de Terny, dans le djebel Lato et à l'Est de Aïn Fezza.

i) *Calcaires de Lato :*

Ce sont des calcaires massifs en bancs épais, leur épaisseur est d'environ 50 m au djebel Lato.

ii) Dolomies de Terny :

Elles correspondent à des dolomies parfois vacuolaires avec de nombreuses stratifications obliques et un aspect très massif, qui permet de bien les distinguer des dolomies de Tlemcen. Elles sont développées au niveau du plateau des Azaïls, de Terny et près du barrage Meffrouch, leur épaisseur est de l'ordre de 100 m dans le plateau de Terny. Elles sont bien représentées au niveau des trois bassins étudiés.

Ces trois formations précédentes sont attribuées au *Tithonique inférieure*.

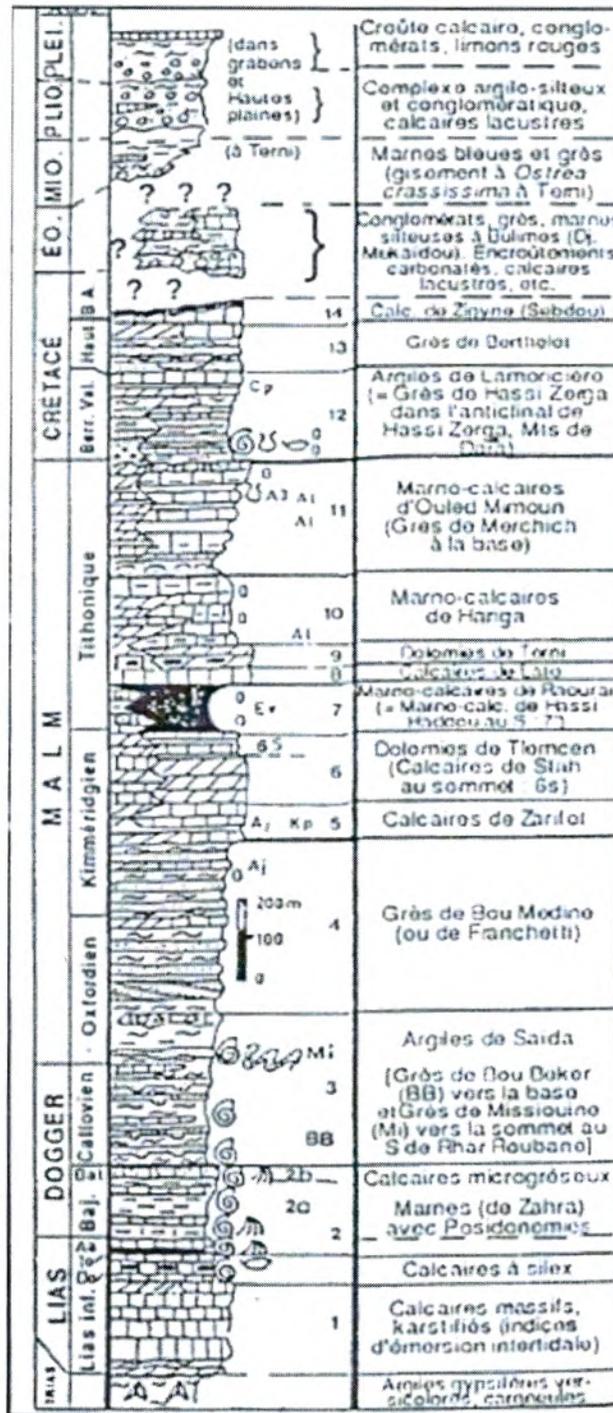


Figure 16: Colonne stratigraphique des monts de Tlemcen jusqu'aux hautes plaines (Benest & Bensalah 1999)

II.2.2 .4 Plio-Quaternaire :

Représenté par des sédiments continentaux d'âges comparables, bien que de natures variables. Il s'agit d'une série complexe de dépôts discontinus formés d'éléments hétérométriques et hétérogènes. On y rencontre les faciès suivants :

- Les travertins villafranchiens situés en bordure des monts de Tlemcen, qui sont représentés par des travertins fortement consolidés et des calcaires lacustres.
- Le complexe de sédiments plio-villafranchiens : la bordure des massifs secondaires est soulignée par des éboulis de piémont plus ou moins encroûtés et remaniés, d'épaisseur très variable mais toujours assez faible.
- Des anciennes alluvions allant des marnes alluvionnaires verdâtres aux galets en passant par les limons et les graviers.

II.2.3 Impact de la géologie sur l'hydrologie :

Le type de formations géologiques qui affleurent dans les bassins versants a une influence sur la répartition des écoulements superficiels. En effet, un bassin formé de matériaux très perméables avec une couverture végétale continue aura en générale une densité de drainage faible assurant une meilleure infiltration des eaux superficielles. Par ailleurs, un bassin formé de roches imperméables mais meubles et érodables, comme des marnes et des argiles, avec une végétation moyenne, présente souvent une densité de drainage élevée, ce qui favorise le ruissellement des eaux superficielles aux dépens de l'infiltration.

II.4 Présentation des sous bassins étudiés

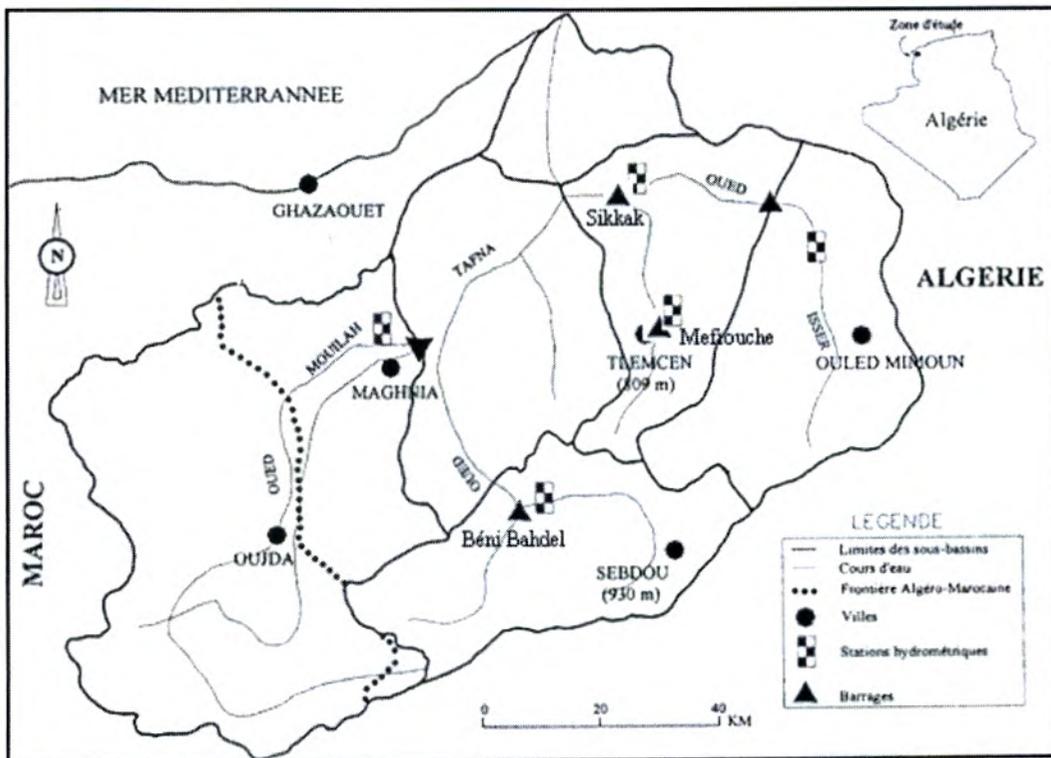


Figure 17: Situation des sous bassins versants de l'oued Sebdoou, Mefrouche et Sikkak

II.4.1 Le Bassin de la Haut –Tafna :

Situé au Nord Ouest algérien et faisant partie du bassin versant de la Tafna, le sous bassin de la Haute – Tafna à Beni – Bahdel a une forme plus ou moins allongée, d'une superficie de 1016 Km² et d'un périmètre de 165 km (Figure 18). L'altitude moyenne étant de 1058m et près de 49% de la surface présente des pentes supérieures à 25%. La dénivelée moyenne donnée par l'indice de pente de Roche est de 1.46.

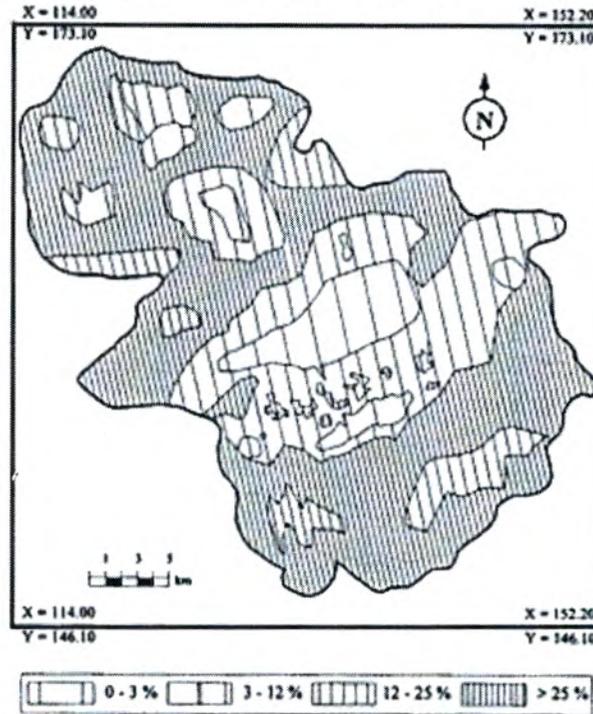


Figure 18 : Carte de pente du bassin de l'oued Sebdou

Ce bassin particulièrement faillé est bien drainé par l'oued Sebdou (Haute –Tafna), il prend naissance dans Ouled Ouriache et se dessine après un grand nombre de ramifications creusées dans les terrains Jurassiques principalement carbonatées qui descendent de crêtes atteignant les 1465m. Ces ramifications se réunissent au niveau de la plaine de Sebdou à 900 m dans les alluvions plio- Quaternaires. L'oued suit ensuite son cours dans une vallée encaissée (le fossé de la Tafna) et se creuse dans les marno-calcaires, les calcaire et Dolomies du jurassique (figure 19) (Benest et als .1999) jusqu'au barrage de Beni- Bahdel ou il rencontre l'oued Khemis en rive gauche.

Le bassin versant de la haute- Tafna à l'instar du Nord algérien à climat semi-aride (Bouanani et als, 1999) est caractérisé par un nombre de jours de pluies réduit et très inégalement réparties durant le cycle hydrologique. Deux à trois mois au plus totalise près de 70% de la hauteur pluviométrique annuelle. Aussi, ce bassin se caractérise, par une sécheresse estivale marquée (moins de 1mm en juillet et août),

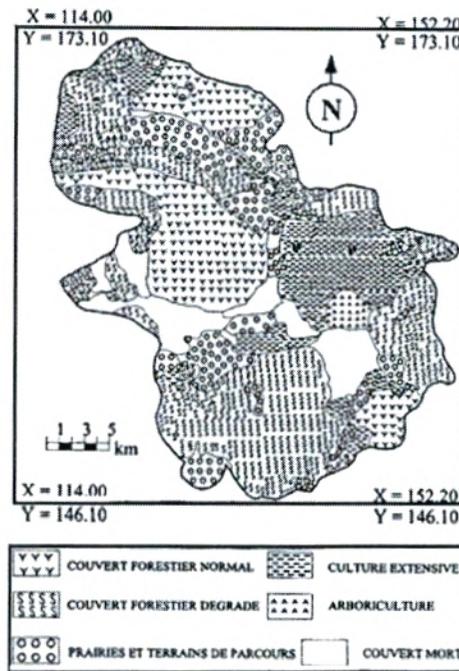


Figure 20 : Cartes D'occupation Du Sol De L'oued Sebdu (Bouanani ; 2004)

II.4.2 Le Bassin d'oued Nachef (Meffrouche) :

Situé entre les latitudes Nord $34^{\circ} 15'$ à $34^{\circ} 52'$ et les longitudes Ouest $1^{\circ} 15'$ à $1^{\circ} 25'$, le bassin versant de l'oued Nachef (Maffrouch) est un sous bassin de la Tafna. Il s'étend sur une superficie de 90km^2 pour un périmètre de 46.7 km . Il est limité au sud par djebel Nador, à l'Est par djebel Ben Yakoub Tichtuine, à l'Ouest par djebel Gendouza et djebel El Zarifet et Beni – Moudjers.

L'oued Nachef est le nom donné au cours d'eau supérieur de l'oued Sikkak, affluent rive gauche du bas Isser, il draine le bassin sur une longueur de 14.25 Km (figure 21). Le profil en long montre des pentes assez fortes en amont. Elles ont tendance à s'adoucir entre les altitudes 1110m et 1170 m à cause de la présence de failles qui entraînent des pertes d'eau par infiltration.

II -1 : Présentation de la zone d'étude

Le bassin versant de la Tafna, situé au Nord Ouest du territoire algérien (fig.1), s'étend sur la totalité de la wilaya de Tlemcen sur une superficie de 7245 km². Selon la nouvelle structuration des unités Hydrologiques en Algérie, le bassin versant de la Tafna appartient à l'ensemble de l'Oranie –Chott Chergui (figure 13).

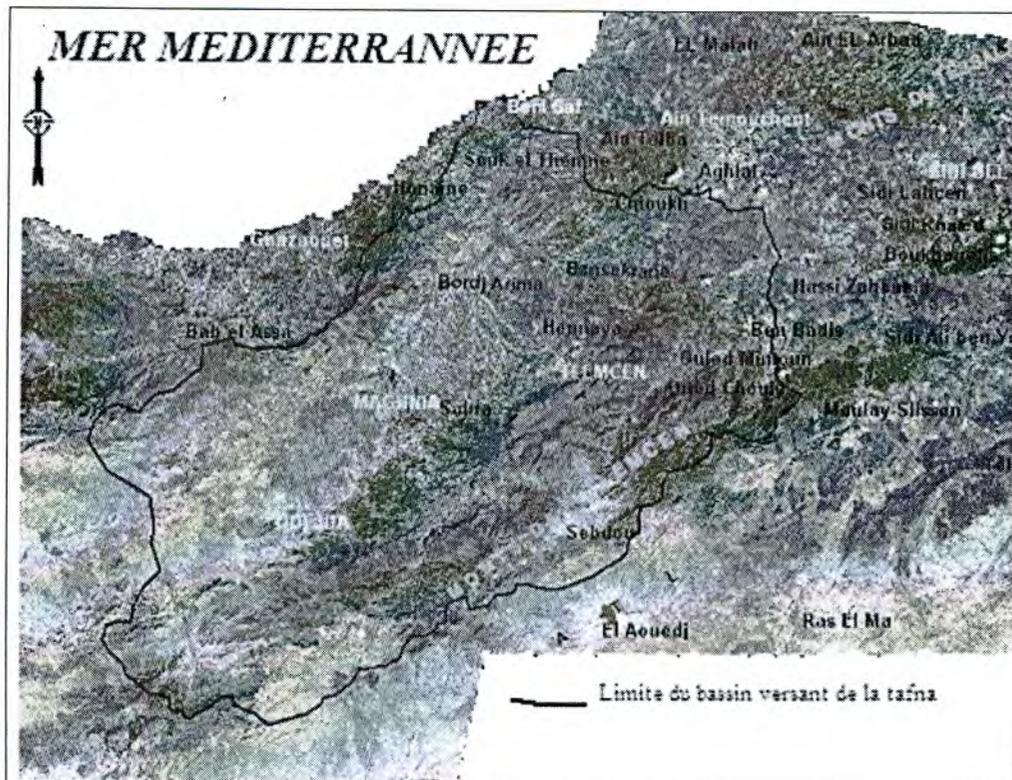


Figure 13 : Délimitation du bassin versant de l'Oued Tafna (Google, Earth).

Globalement, le bassin versant peut être subdivisé en trois grandes parties (figure 14) :

- partie orientale avec comme principaux affluents l'oued Isser et l'oued Sikkak),
- partie occidentale comprenant la Haute Tafna (oued Sebdo et oued Khemis) et l'oued Mouilah
- partie septentrionale : qui débute pratiquement du village Tafna et s'étend jusqu'à la plage de Rachgoune, embouchure de la Tafna sur la mer. Les oueds Boukiou, Boumessaoud et Zitoun sont les principaux affluents de cette partie.

Les plaines du bassin de la Tafna s'étendent aux pieds des monts de Tlemcen en avant des massifs de Traras et du Tessala, elles sont entourées de massifs aux reliefs élevés dessinant un édifice régulier formé essentiellement de terrains mésozoïques et cénozoïques.

Les monts des Traras au Nord Ouest dressent une barrière entre le bassin et la mer, ils correspondent à une série de crêtes de direction NE – SW culminant à 1136 m au djebel Fillaoucène.

L'oued Tafna est un cours d'eau de 170 Km de long, il prend sa source dans les Monts de Tlemcen. Le cours de cet oued peut se subdiviser en trois parties : la haute Tafna, la moyenne Tafna et la basse Tafna.

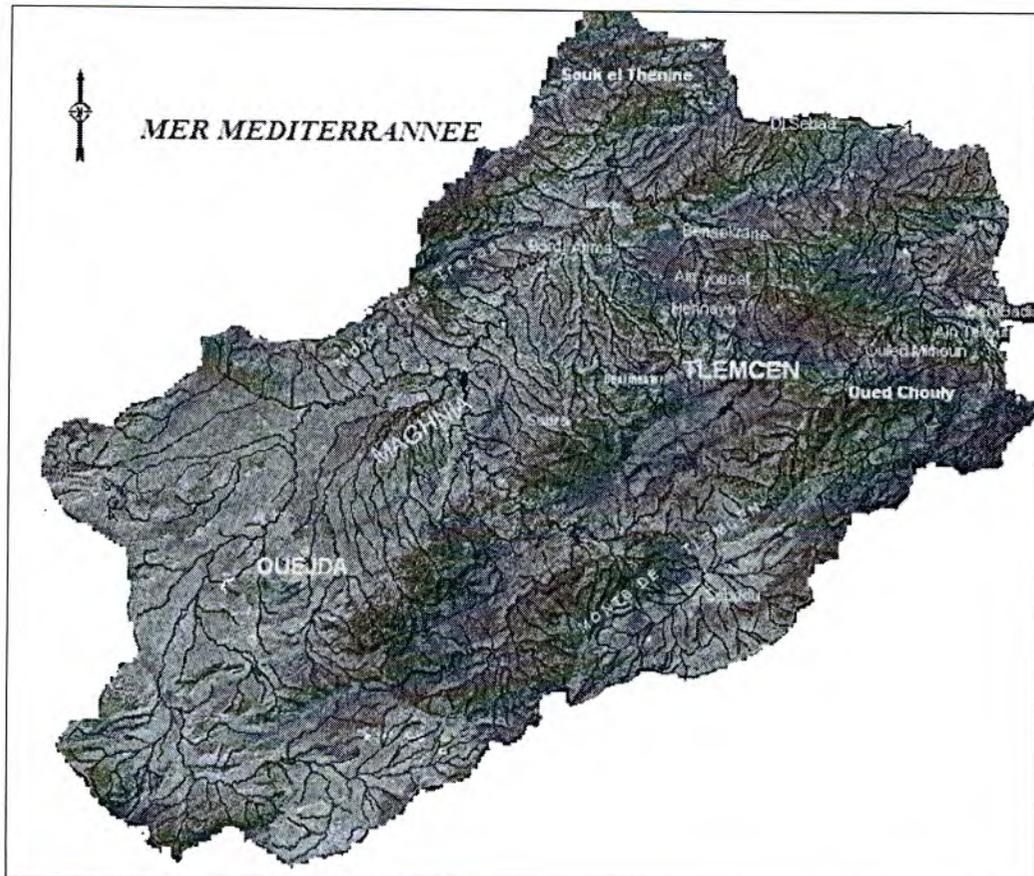


Figure 14 : Réseau hydrographique de la Tafna (Google Earth)

II.2 Géologie et interaction hydrologique :

La lithologie joue un rôle important sur le ruissellement, l'infiltration, l'érosion et le transport solide. Les matériaux géologiques se distinguent en formations meubles (sables, argiles, marnes) ou en formations consolidées (grés, calcaires, dolomies,...). La nature des affleurements a une influence sur l'hydrologie de surface et le type du dépôt alluvionnaire.

Nous allons présenter brièvement quelques caractères généraux sur la géologie de la Tafna

II.2.1 Cadre générale :

La structure actuelle de l'Algérie du Nord est liée aux mouvements hercyniens et alpins qui ont permis l'individualisation de plusieurs domaines. En Oranie, du Nord au Sud (figure 15):

- le domaine tellien
- le domaine tlemcenien dominé essentiellement par les monts de Tlemcen,
- les hautes plaines oranaises,
- le domaine atlasique,
- et le domaine saharien.

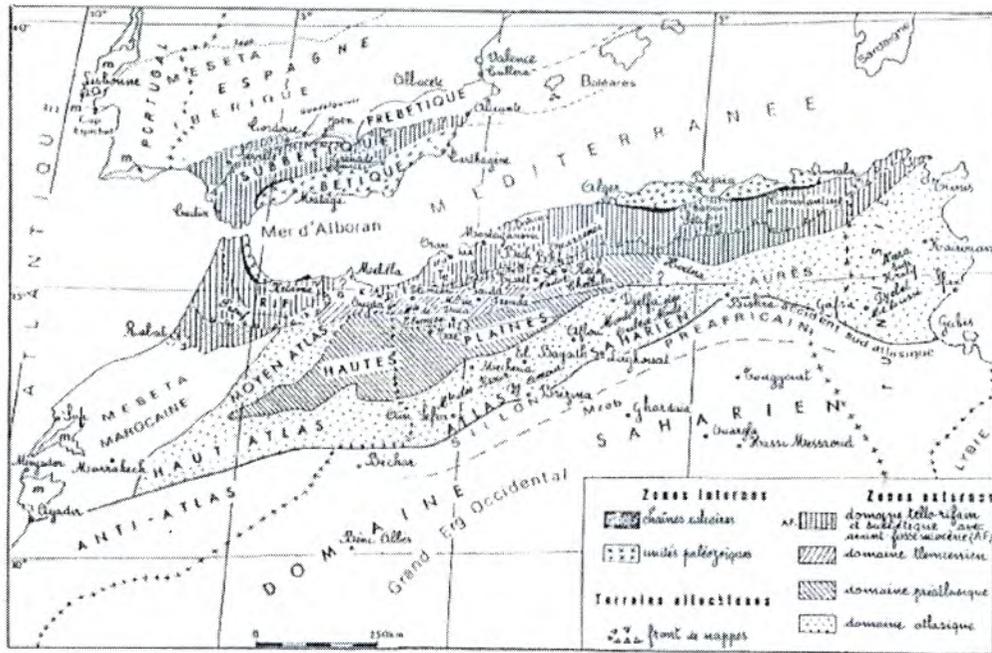
Le bassin de la Tafna comprend de grandes plaines, dont les deux principales sont celle de Maghnia à l'Ouest et celle des Ghossels à l'Est entourées de massifs élevés :

- le massif des Traras comprenant la chaîne des Fillaoucène qui s'étend vers l'Ouest par le massif des Béni-Snassen.

- les monts de Tlemcen dessinant la bordure sud du bassin et s'interposent entre deux domaines bien définis :

- le domaine des nappes du Tell au Nord,
- le domaine stable des hautes plaines oranaises au Sud.

La terminaison occidentale des monts de Tlemcen qui s'élève graduellement du Nord vers le Sud est occupée par un massif montagneux représenté par les monts de Rhar-Roubane.



Hoch, Brechtort ; H Rb, Bou Rheddou ; Dj. F. Djebel Fillaoucène ; G. Chaîne du Guez ; HZ. Hoss Zerga ; BR. Zone intrarifaine ; K. Kaldana ; MA. Monts d'Arzew ; Mu. Djebel Mardjaja ; Rech. Djebel Rochaya ; Tac. Djebel Tazerza ; Te. Monts du Texila ; m. Massif de Portugal et du Maroc atlantique comprenant du Jurassique supérieur et du Crétacé basal.

Figure 15 : Schéma structurale de la chaîne alpine de la Méditerranée occidentale (Benest, 1985)

II.2.2 La série lithostratigraphique :

Le grand bassin de la Tafna est caractérisé par une géologie très complexe et qualifiée de grande tectonique. L'évolution des terrains rencontrés va du Primaire au Plio-Quaternaire (Figure 16).

II.2.2.1 Primaire :

Il affleure dans le bassin de l'oued Mouilah au niveau des Monts de Ghar roubane à l'ouest et les Fillaoucène à l'Est. Il est représenté par :

a)- formations schisto-quartziques :

D'âge silurien à dévonien, il s'agit de formations fortement plissées recouvrant une grande surface. A Rhar-Roubane et djebel Fillaoucène, les schistes sont alternés avec des quartzites très compacts en bans décimétriques.

b)- granite :

Le massif granitique est situé immédiatement au NE de la ville de Nedroma. Il est de forme elliptique et de couleur blanchâtre à rosâtre.

c)- auréole de métamorphisme :

L'intrusion granitique développe une auréole de métamorphisme dans la formation schistoquartzique. On y trouve des cornéennes, des schistes à andalousites et des schistes tachetés.

II.2.2.2 Secondaire :

Il occupe une grande partie de nos bassins versants étudiés et forme l'essentiel des monts de Tlemcen. La série lithostratigraphique schématisée par le log de la figure 11 est représentée par :

a)- Trias :

Localisé essentiellement au Nord d'Aïn Tellout et au niveau de Béni-Bahdel et à l'Est dans le bassin d'oued Mouilah. Il est constitué par des argiles plus ou moins dolomitiques et gypseuses et des marnes bariolées fortement teintées.

b)- Le Jurassique :

i) *Les argiles de Saïda :*

Elles correspondent à des dépôts argileux et marneux, parfois schisteux à passées gréseuses. La formation peut atteindre 300 m jusqu'à 500 m est attribuée au *Callovo-Oxfordien*, elle offre parfois une transition assez progressive aux grès de Boumediene.

ii) *Les grès de Boumediene :*

D'âge *Oxfordien supérieur-Kimméridgien inférieur*, il s'agit d'un ensemble à dominance gréseuse, avec des passées argileuses masquées le plus souvent, par des éboulis ou la végétation. Ces grès à ciment calcaire, se présentent en bancs assez durs, dont les épaisseurs sont variables pouvant atteindre 500 m.

Les grès de Boumediene sont particulièrement développés dans les forêts de Zarifet et de Hafir au SW de Terny et au niveau des cascades d'El Ourit au Sud du bassin d'oued Sikkak.

i) *Les calcaires de Zarifet :*

Il s'agit de bancs calcaires séparés par de minces intercalations de calcaires marneux écaillieux, parfois quelque peu fossilifères, marquant presque partout la base très nette du Kimméridgien et reposent directement en concordance sur les grès de Boumediene formant les falaises des environs de Tlemcen. L'épaisseur de cette formation peut atteindre 25 m au col de Zarifet.

i) *Dolomies de Tlemcen :*

D'âge *Kimméridgien moyen-Kimméridgien supérieur*, il s'agit de dolomies cristallines grises, avec de nombreuses cavités remplies de calcite. Elles affleurent autours d'Aïn Fezza, dans la forêt de Zarifet, au Nord de Tlemcen, dans les djebels Teffatisset, Aïn El Hout et sur le plateau de Terny. Elles peuvent être surmontées par les calcaires de Stah épargnées par la dolomitisation. Cette formation peut atteindre 200 m aux environs de Tlemcen à El Ourit et on la rencontre dans tous les sous-bassins étudiés.

i) *Marno-calcaires de Raouraï :*

Ce sont des marnes grises, blanchâtres en surface, intercalées de nombreux lits et bancs de calcaires marneux durs. Cette formation est limitée à sa base par les lits calcaires de Stah et au Sommet par les calcaires de Lato, ou les premières assises des dolomies de Terny. Elle affleure Particulièrement sur le plateau de Terny, dans le djebel Lato et à l'Est de Aïn Fezza.

i) *Calcaires de Lato :*

Ce sont des calcaires massifs en bancs épais, leur épaisseur est d'environ 50 m au djebel Lato.

ii) **Dolomies de Terny :**

Elles correspondent à des dolomies parfois vacuolaires avec de nombreuses stratifications obliques et un aspect très massif, qui permet de bien les distinguer des dolomies de Tlemcen. Elles sont développées au niveau du plateau des Azaïls, de Terny et près du barrage Meffrouch, leur épaisseur est de l'ordre de 100 m dans le plateau de Terny. Elles sont bien représentées au niveau des trois bassins étudiés.

Ces trois formations précédentes sont attribuées au *Tithonique inférieure*.

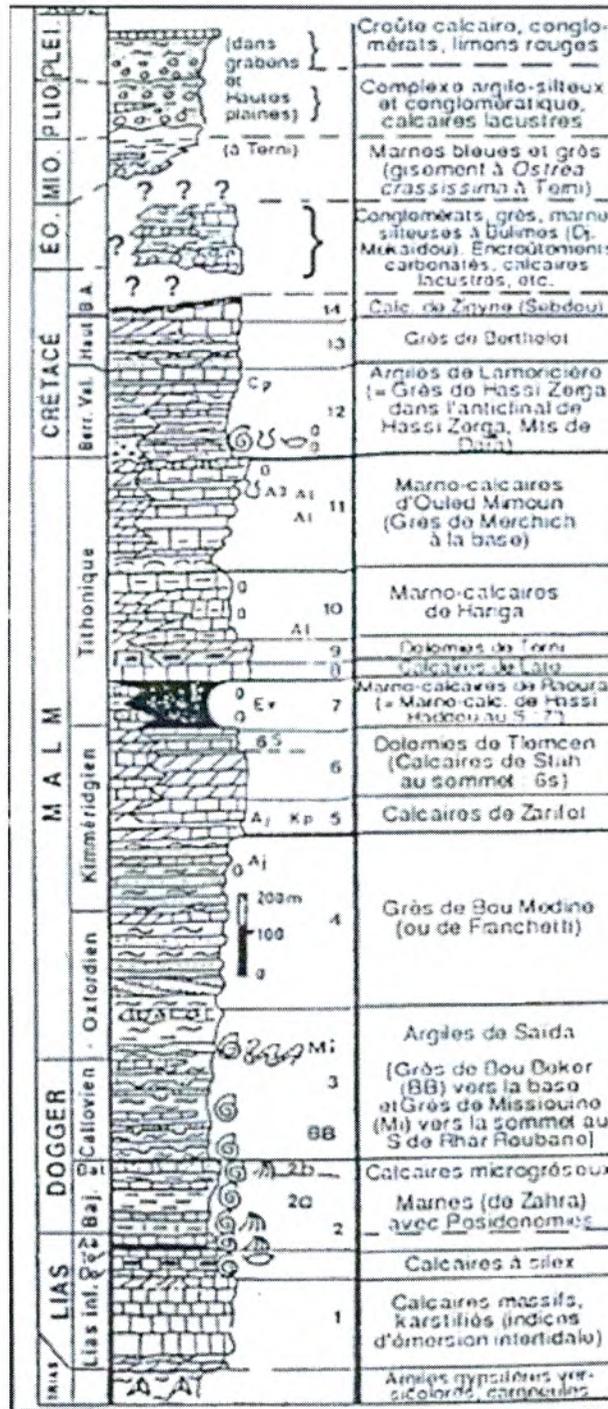


Figure 16: Colonne stratigraphique des monts de Tlemcen jusqu'aux hautes plaines (Benest & Bensalah 1999)

II.2.2 .4 Plio-Quaternaire :

Représenté par des sédiments continentaux d'âges comparables, bien que de natures variables. Il s'agit d'une série complexe de dépôts discontinus formés d'éléments hétérométriques et hétérogènes. On y rencontre les faciès suivants :

- Les travertins villafranchiens situés en bordure des monts de Tlemcen, qui sont représentés par des travertins fortement consolidés et des calcaires lacustres.
- Le complexe de sédiments plio-villafranchiens : la bordure des massifs secondaires est soulignée par des éboulis de piémont plus ou moins encroûtés et remaniés, d'épaisseur très variable mais toujours assez faible.
- Des anciennes alluvions allant des marnes alluvionnaires verdâtres aux galets en passant par les limons et les graviers.

II.2.3 Impact de la géologie sur l'hydrologie :

Le type de formations géologiques qui affleurent dans les bassins versants a une influence sur la répartition des écoulements superficiels. En effet, un bassin formé de matériaux très perméables avec une couverture végétale continue aura en générale une densité de drainage faible assurant une meilleure infiltration des eaux superficielles. Par ailleurs, un bassin formé de roches imperméables mais meubles et érodables, comme des marnes et des argiles, avec une végétation moyenne, présente souvent une densité de drainage élevée, ce qui favorise le ruissellement des eaux superficielles aux dépens de l'infiltration.

II.4 Présentation des sous bassins étudiés

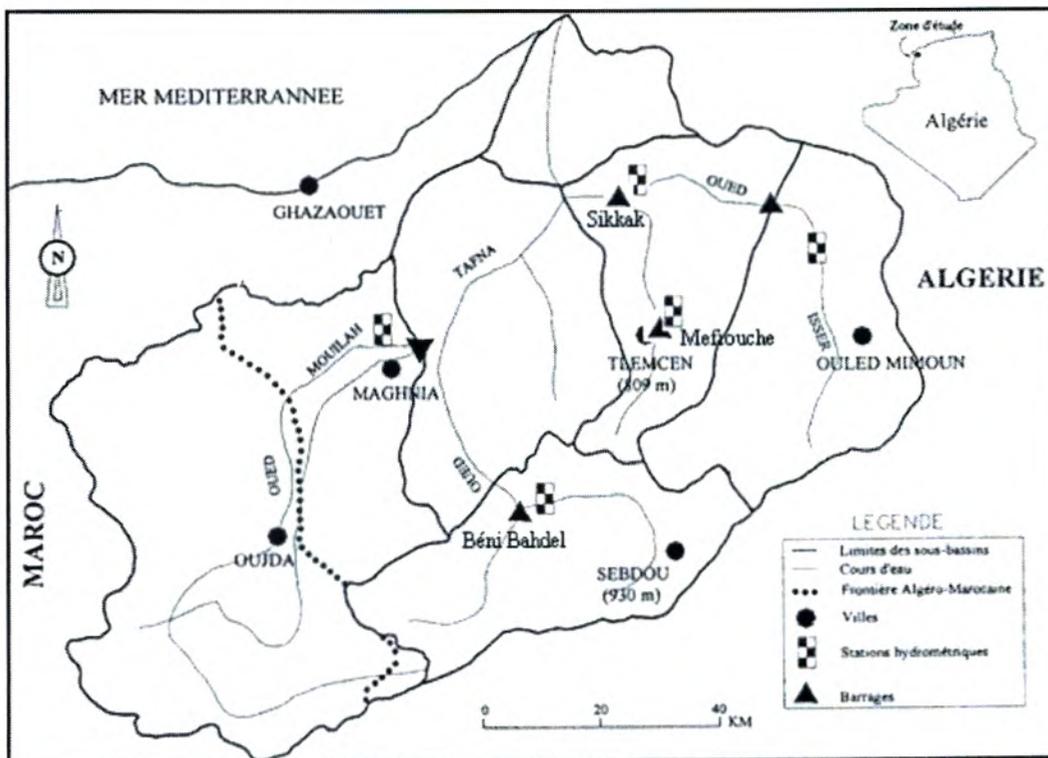


Figure 17: Situation des sous bassins versants de l'oued Sebdo, Mefrouche et Sikkak

II.4.1 Le Bassin de la Haut –Tafna :

Situé au Nord Ouest algérien et faisant partie du bassin versant de la Tafna, le sous bassin de la Haute – Tafna à Beni – Bahdel a une forme plus ou moins allongée, d'une superficie de 1016 Km² et d'un périmètre de 165 km (Figure 18). L'altitude moyenne étant de 1058m et près de 49% de la surface présente des pentes supérieures à 25%. La dénivelée moyenne donnée par l'indice de pente de Roche est de 1.46.

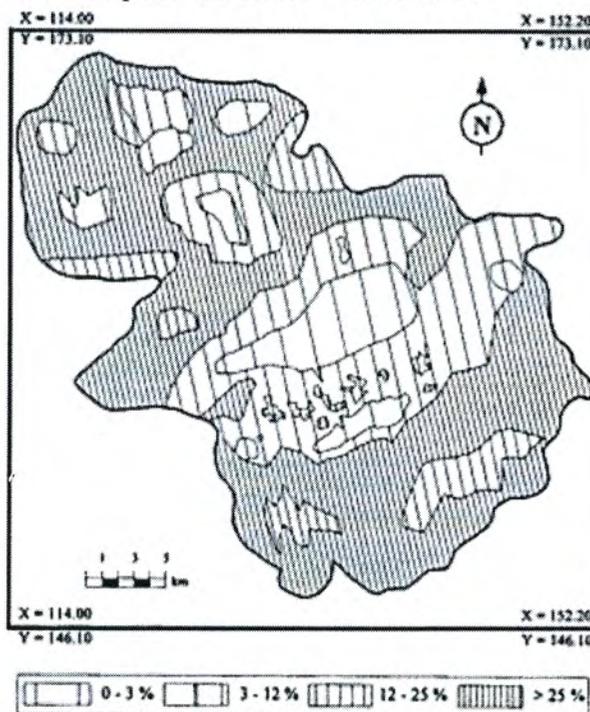


Figure 18 : Carte de pente du bassin de l'oued Sebdou

Ce bassin particulièrement faillé est bien drainé par l'oued Sebdou (Haute –Tafna), il prend naissance dans Ouled Ouriache et se dessine après un grand nombre de ramifications creusées dans les terrains Jurassiques principalement carbonatées qui descendent de crêtes atteignant les 1465m. Ces ramifications se réunissent au niveau de la plaine de Sebdou à 900 m dans les alluvions plio- Quaternaires. L'oued suit ensuite son cours dans une vallée encaissée (le fossé de la Tafna) et se creuse dans les marno-calcaires, les calcaire et Dolomies du jurassique (figure 19) (Benest et als .1999) jusqu'au barrage de Beni- Bahdel ou il rencontre l'oued Khemis en rive gauche.

Le bassin versant de la haute- Tafna à l'instar du Nord algérien à climat semi-aride (Bouanani et als, 1999) est caractérisé par un nombre de jours de pluies réduit et très inégalement réparties durant le cycle hydrologique. Deux à trois mois au plus totalise près de 70% de la hauteur pluviométrique annuelle. Aussi, ce bassin se caractérise, par une sécheresse estivale marquée (moins de 1mm en juillet et août),

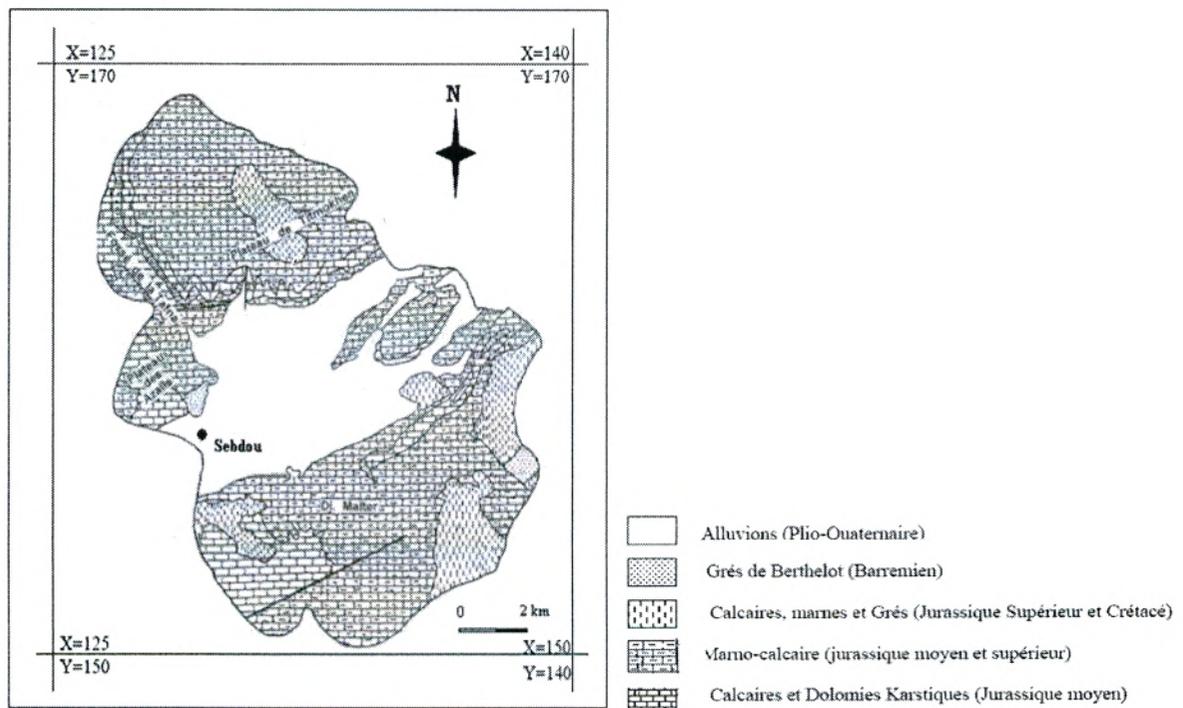


Figure 19 : Carte lithologique du bassin versant de l'oued Sebdoù
(Bouanani; 2004)

Les sols et végétation dans le bassin de l'oued Sebdoù : (figure 20)

Les sols dans cette zone peuvent être subdivisés en trois classes :

- les sols calcaires couvrant une grande partie du bassin où se développe une arboriculture non irriguée et un élevage de montagne
- les sols alluvionnaires constituant la cuvette de Sebdoù où émergent de nombreuses sources,
- Les sols constitués par des croûtes calcaréo-gréseuses ou marno-gréseuses ainsi que des argiles de calcification où l'on retrouve un couvert forestier bien développé

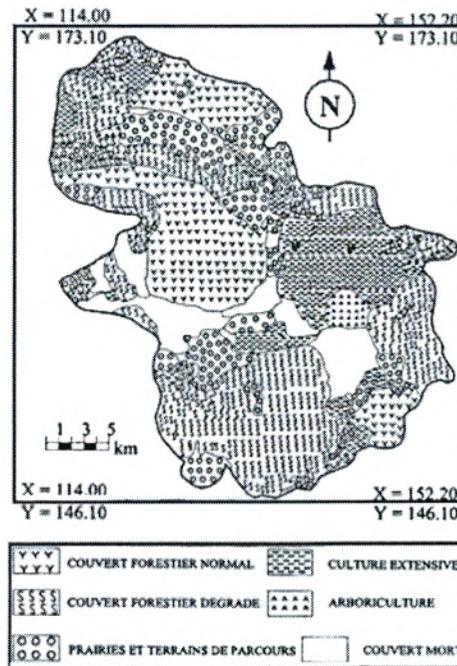


Figure 20 : Cartes D'occupation Du Sol De L'oued Sebdo (Bouanani ; 2004)

II.4.2 Le Bassin d'oued Nachef (Meffrouche) :

Situé entre les latitudes Nord $34^{\circ} 15'$ à $34^{\circ} 52'$ et les longitudes Ouest $1^{\circ} 15'$ à $1^{\circ} 25'$, le bassin versant de l'oued Nachef (Maffrouch) est un sous bassin de la Tafna. Il s'étend sur une superficie de 90km^2 pour un périmètre de 46.7 km. Il est limité au sud par djebel Nador, à l'Est par djebel Ben Yakoub Tichtuine, à l'Ouest par djebel Gendouza et djebel El Zarifet et Beni – Moudjers.

L'oued Nachef est le nom donné au cours d'eau supérieur de l'oued Sikkak, affluent rive gauche du bas Isser, il draine le bassin sur une longueur de 14.25 Km (figure 21). Le profil en long montre des pentes assez fortes en amont. Elles ont tendance à s'adoucir entre les altitudes 1110 et 1170 m à cause de la présence de failles qui entraînent des pertes d'eau par infiltration.

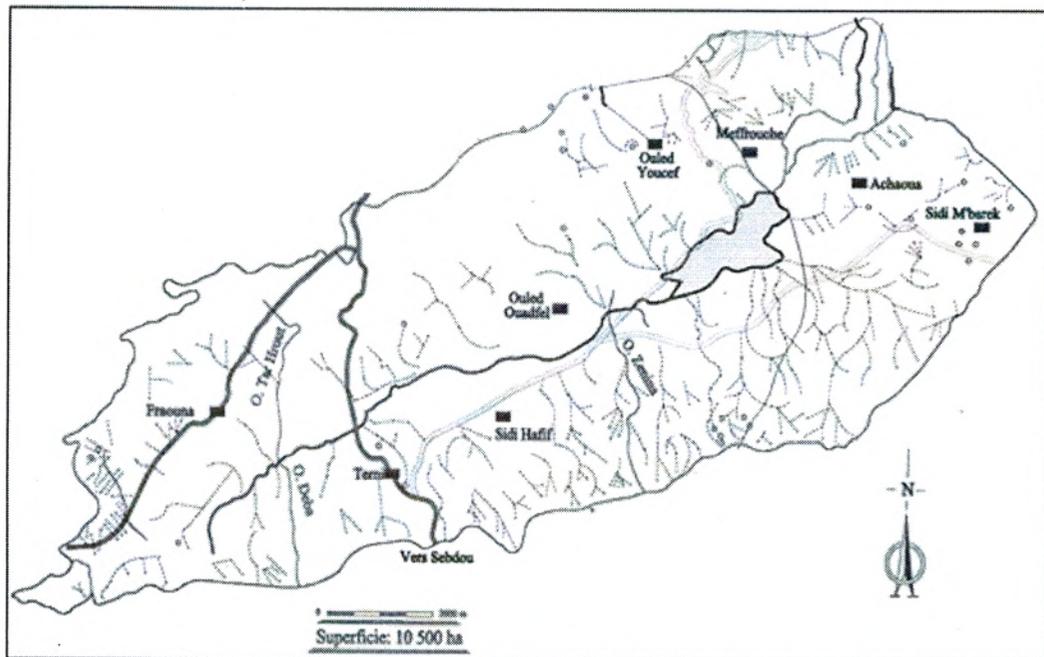


Figure 21 : Réseau hydrographique du bassin Meffrouche(A.N.A.T)

La géologie du bassin versant du Maffrouche se caractérise par deux grands ensembles, domaines calcaires dolomitiques du jurassique au sud et domaine marneux du miocène au nord (Figure 22).

- Calcaire dolomie du jurassique :

La présente série calcaire appartenant au Jurassique, caractérisée par une succession de calcaires sublithographique fins passant en bas à des dolomies.

- Marne Miocène : Se sont des marnes présentant en intercalation des bans de grès jaunâtre très dure.

Les massifs jurassiques rocheux, calcaires et dolomitiques admettent une maigre couverture forestière. Les grès de Boumediene sont caractérisés par l'abondance cistus daniferus et par quercus suber qui constituent les belles forêts d'Hafir et Zarifet (Bouanani, 2004)

Test analytique :

Parmi les tests utilisés nous avons le test du Khi², le test de Kolmogorov, et on peut aussi utiliser un test qui considère les coefficients d'asymétrie et d'aplatissement. Le test de Khi² deux mesures l'écart qu'il y a entre les fréquences observées et les fréquences théoriques, il est donné par la statistique du χ^2 . Il est utilisé pour déterminer si une distribution théorique comme la distribution normale, peut ajuster une distribution empirique, c'est à dire une distribution calculée à partir des données observées.

La loi normale est la loi statistique la plus répandue et la plus adéquate à nos séries pluviométriques annuelles. De plus, de nombreuses autres lois statistiques peuvent être approchées par la loi normale. Pour notre cas, nous allons appliquer les tests graphique et le test du X² sur les données des trois sous bassins considérées auparavant ; c'est à dire la station de Beni Bahdel, de Meffrouche, et de Sikkak, et ce en utilisant le logiciel Statistica7.

III.2.2 Ajustement des précipitations de chaque sous bassins :

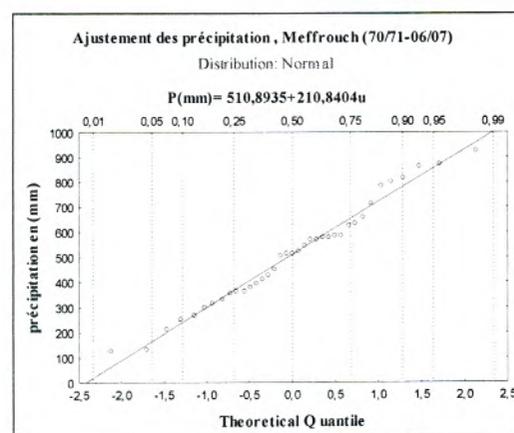
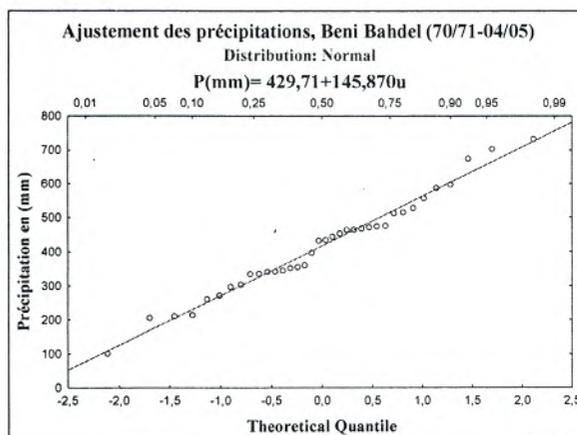
- Test du χ^2

Tableau 5 : Résultats du test du Khi²

Test d'erreurs = 5%	Khi 2 Calculé		Khi2 tabulé		Ajustement probable
	Loi log normale	Loi normale	Log normale	Loi normale	
Beni Bahdel	0.53	1.22	3.84		La loi log normale
Meffrouch	3.68	3.70			La loi log normale
Sikkak	2.24	0.38			La loi normale

- Test Graphique

Contrairement au test du χ^2 , le test graphique montre que les précipitations relatives à nos stations s'ajustent mieux à une loi normale (figure 28).



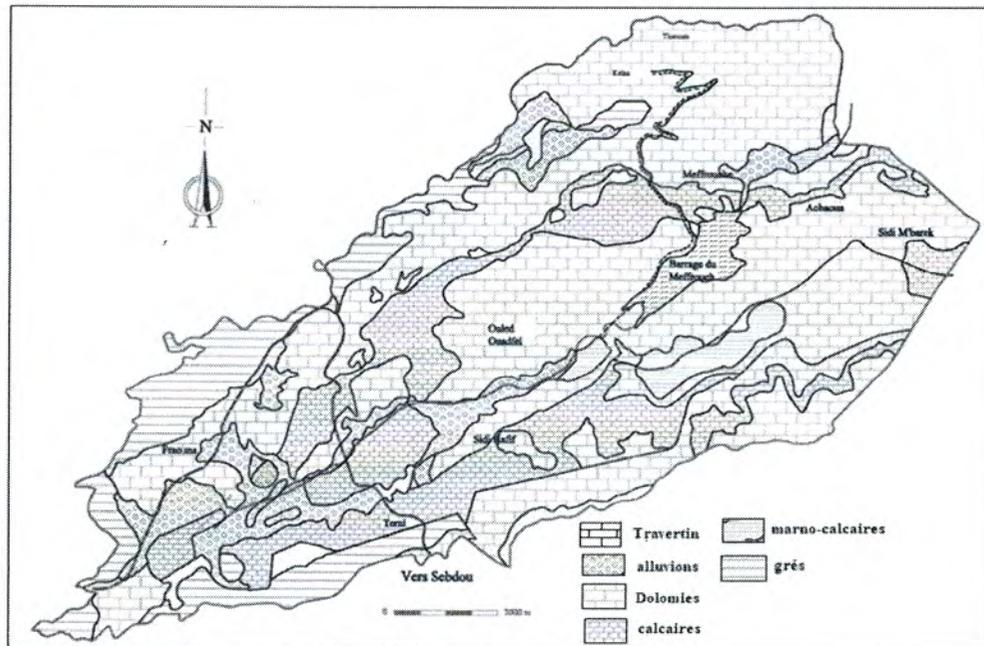


Figure 22: Carte lithologique du bassin versant d'oued Nachef (Meffrouche) (A.N.A.T)

II.4.3 Le Bassin D'oued Sikkak :

Le bassin versant du Sikkak où est érigé un barrage d'une capacité de 30 Hm³, couvre une surface de 218 km² pour un périmètre de 65 km. Oued Sikkak est un affluent rive gauche de l'oued Isser. Son altitude moyenne est de 475m. Le relief est assez fort avec un Ig de Roche de 0,037. Le bassin du Sikkak est assez bien drainée (Dd=2,42).

Sur le plan géologique, Le bassin de l'oued Sikkak présente deux secteurs bien distincts (figure 23):

- au Nord une dépression où le principal élément ayant contribué au remplissage est représenté par le Miocène marneux. Il est surmonté par les graviers argileux et conglomérats plio-quaternaires sous les alluvions récentes de la plaine d'Henaya (Hayane, 1983)
- au Sud, et à l'Est les massifs montagneux où affleurent principalement des terrains jurassiques (grès, calcaires, marno-calcaires et dolomies) faillés et bien karstifiés. (Benest et al 1999).

Les massifs jurassiques rocheux, calcaires et dolomitiques admettent une maigre Couverture forestière. Les grès de Boumediene sont caractérisés par l'abondance de *cistus daniferus* et par *quercus suber* qui constituent de belles forêts d'Hafir et Zarifet.

Les marnes miocènes et les alluvions quaternaires sont occupées par les céréales et les prairies naturelles. Les broussailles occupent une petite surface dans notre bassin, concentrées dans la région de la commune de Ain Fezza et au djebel Ain El Hout. (Figure 24).

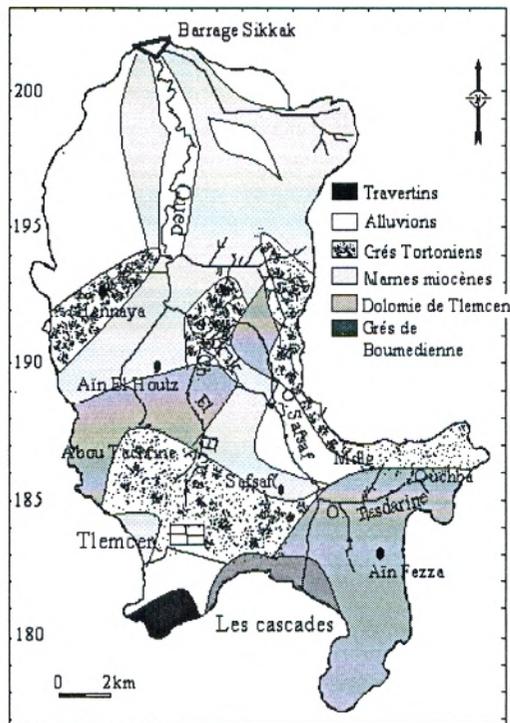


Figure 23 : Carte lithologique du bassin versant d'oued Sikkak (Bouanani ; 2004)

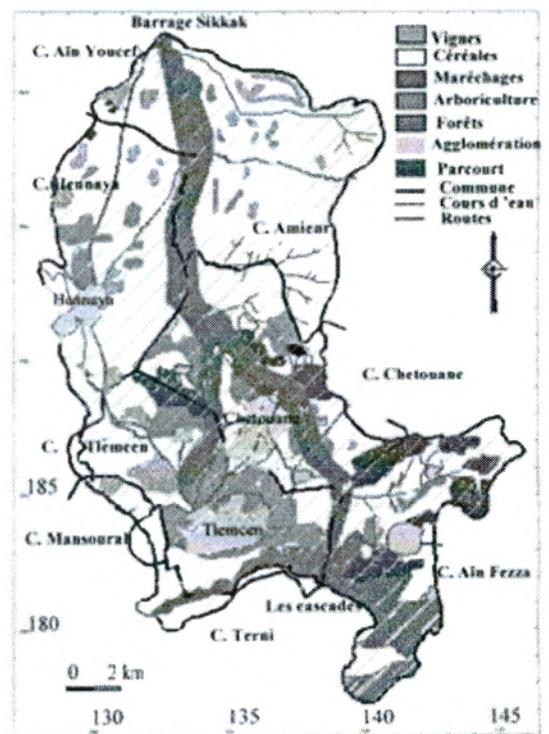


Figure 24: carte d'occupation du sol du bassin versant d'oued Sikkak (Bouanani ; 2004)

CHAPITRE III

**ANALYSE DES PARAMETRES
HYDROLOGIQUES**

INTRODUCTION

L'étude de l'impact de l'évolution du climat sur le régime des débits d'écoulement de surface nécessite la connaissance des paramètres hydrologiques et leur variabilité spatio-temporelle. A cet égard, nous proposons une étude hydrologique, en vue d'évaluer les caractéristiques des écoulements superficiels des trois sous bassins.

Pour l'élaboration de cette étude nous avons utilisé les données mensuelles et annuelles des précipitations, des lames d'eau écoulées et de l'évapotranspiration potentielle au niveau des stations des barrages Béni Bahdel et Meffrouch, pour les deux bassins de la Haute Tafna et du Mefrouche alors que pour ce bassin du Sikkak , nous avons utilisé les précipitations mesurées à la station de Tlemcen, les débits étant ceux de la station d'Aïn Youcef (barrage sikkak).

III.1 Les paramètres physiques

L'analyse des phénomènes hydrologiques en général et des composantes du cycle hydrologique en particulier est considérablement facilitée par l'adoption d'une unité géographique restreinte ayant certaines caractéristiques communes : le bassin versant. Aussi, l'écoulement annuel à l'exutoire d'un bassin est déterminé par les conditions climatiques de la région et par l'utilisation du territoire. Cependant, deux bassins voisins soumis aux mêmes conditions climatiques peuvent avoir un régime d'écoulement totalement différent. Cette différence est principalement causée par les diverses caractéristiques physiques des deux bassins. Ainsi, le diagnostic physico-géographique, première étape de la connaissance des bassins versants, permet de caractériser les principaux facteurs naturels intervenant dans les processus de l'écoulement superficiel; facteurs orographiques, morphologiques, lithologiques, climatiques et biogéographiques. Leur interaction est déterminante dans le comportement hydrologique des bassins. De ce fait, la transposition des données hydrométriques d'un bassin à un autre ne peut se faire sans connaître l'influence qu'exercent certains facteurs physiques sur l'écoulement.

Les caractéristiques morphométriques du bassin versant sont résumés dans le tableau 3 suivant :

Tableau 3 : principaux paramètres physiques des sous bassins d'étude

Paramètres	Unité	symbole	Haute Tafna	Mefrouche	Sikkak
Superficie	km ²	A	1016	90	218
Périmètre	km	P	165	46,7	65
Indice de compacité	-	Kc	1,45	1,41	1,23
Longueur du rectangle équivalent	km	L _{RE}	67,47	18,77	28,5
Longueur du talweg principal	km	L _p	15,06	14,25	20
Densité de drainage	km/km ²	D _d	2,40	2,51	2,42
Coefficient de torrentialité	-	C _t	12,8	7,8	1,9
Temps de concentration	Heures	T _c	9,50	3,2	9
Indice de pente de Roche	-	I _p	0,9	0,44	1,51
Indice de pente global	m/km	I _g	15,40	16,94	37
Altitude minimale	m	H _{min}	650	1100	200
Altitude maximale	m	H _{max}	1824	1500	1412
Altitude moyenne	m	H _{min}	1147	1190	475

III.2 : Etude des précipitations :

Pour cette étude, nous avons pris en considérations les valeurs annuelles et mensuelles des précipitations des stations des trois sous bassins.

Pour Beni Bahdel la station du Barrage, dont les données sont disponibles entre (70/71-04/05)

Pour Meffrouch la station du barrage dont les données sont disponibles entre (70/71-06/07)

Pour Sikkak nous avons utilisé la station de Tlemcen pour la période (63/64-00/01).

La moyenne interannuelle des précipitations calculée est de 429.71mm pour la station de Beni Bahdel, elle est de 510.89 mm pour la station Meffrouch, et de 480.54mm pour la station de Tlemcen.

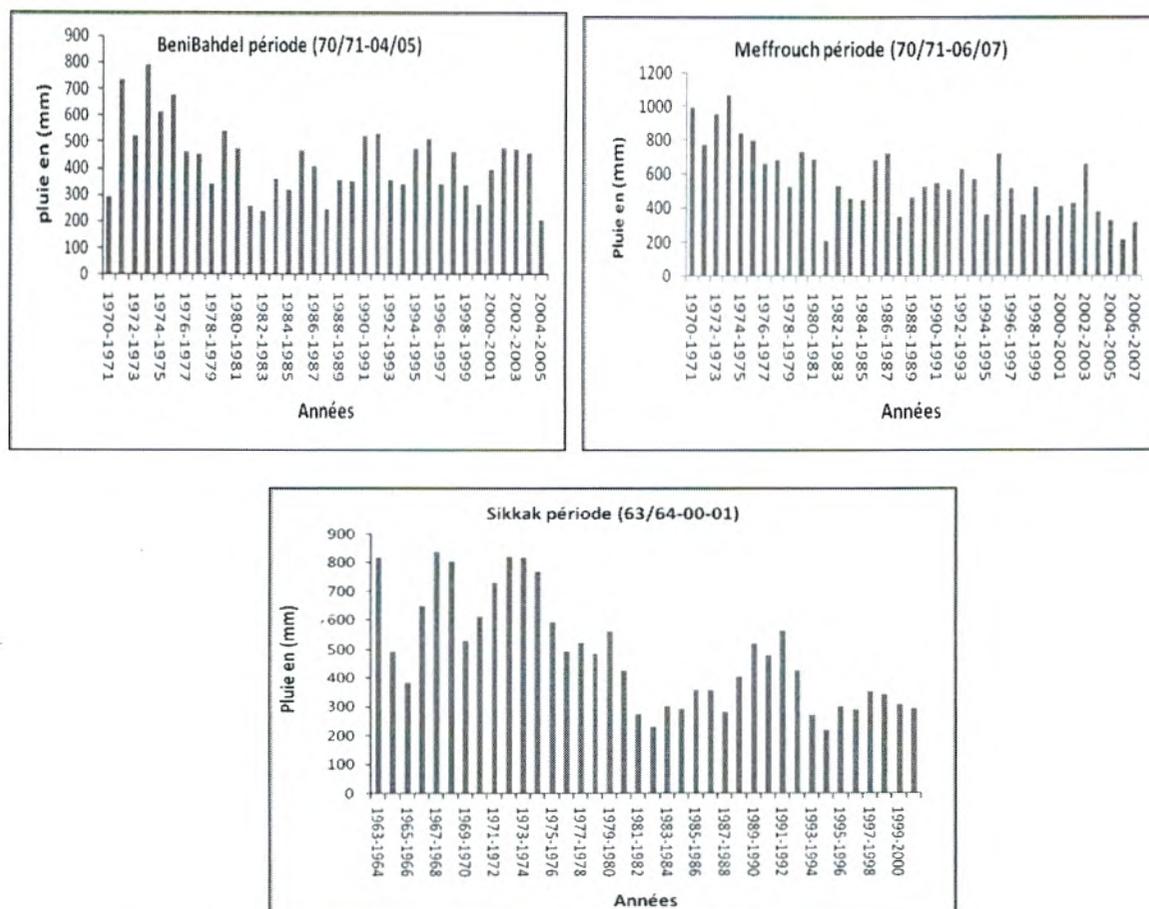


Figure 25 : Variations interannuelles des précipitations des différents sous bassins

Le régime annuel est très irrégulier d'une année à l'autre (Figure 25). Pour **Beni Bahdel** la période (1970-1981) correspond à des années humides avec un maximum au cours de l'année (1973-1974), **pour Meffrouche** c'est (1973-1976) qui constitue une période humide avec un maximum au cours de l'année (1973-1974), au niveau du **Sikkak** (1967-1980) correspond à des années humides avec un maximum au cours de l'année (1967-1968). Les années les plus sèches sont celles de (1981-1993) pour **Beni Bahdel**, (1981,85-1999) pour le **Meffrouche** et (1981-1983) pour le **Sikkak**. En effet, durant ces dernières années, ces oueds sont pratiquement à sec.

Les variations des précipitations moyennes mensuelles des différentes périodes pour chaque sous bassins montrent que les mois les plus pluvieux sont Mars et Avril. Les mois de Juin, Juillet et Août sont pratiquement secs. (Figure 26)

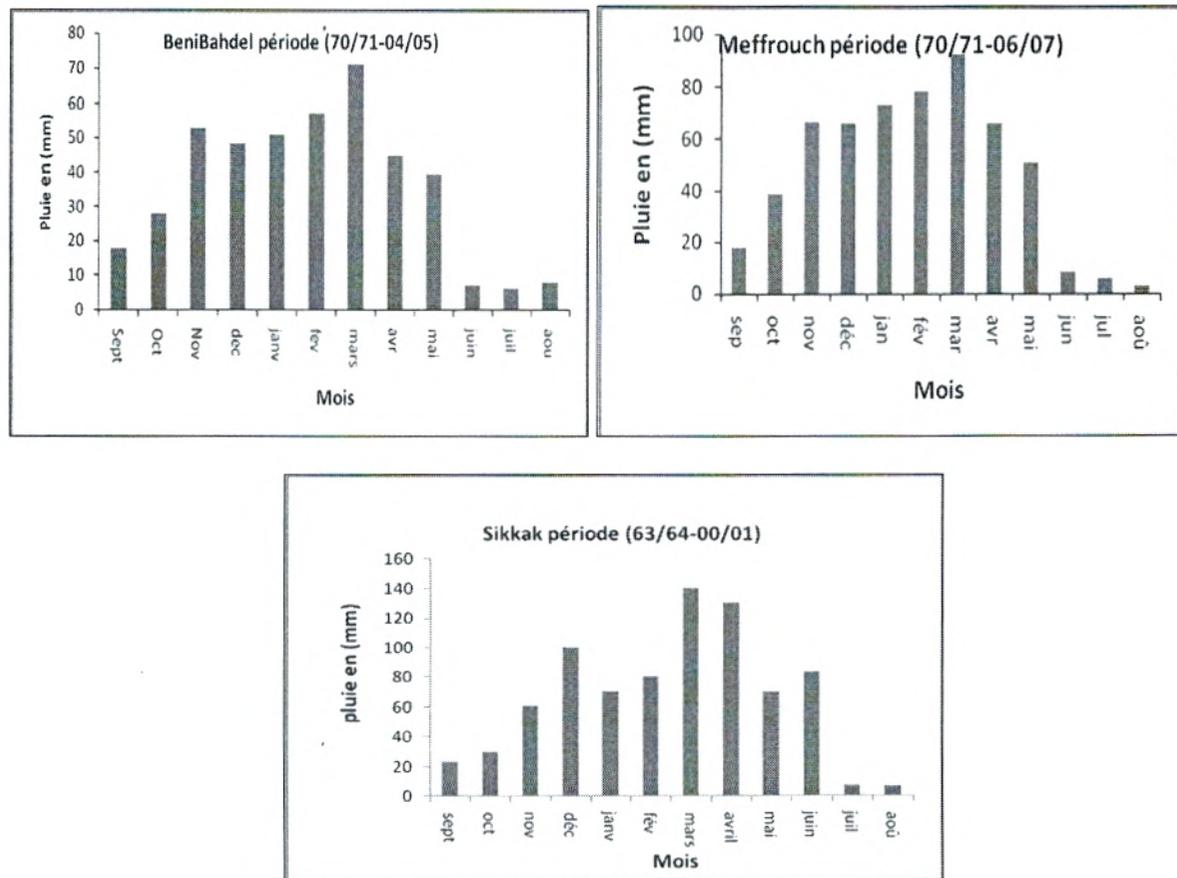
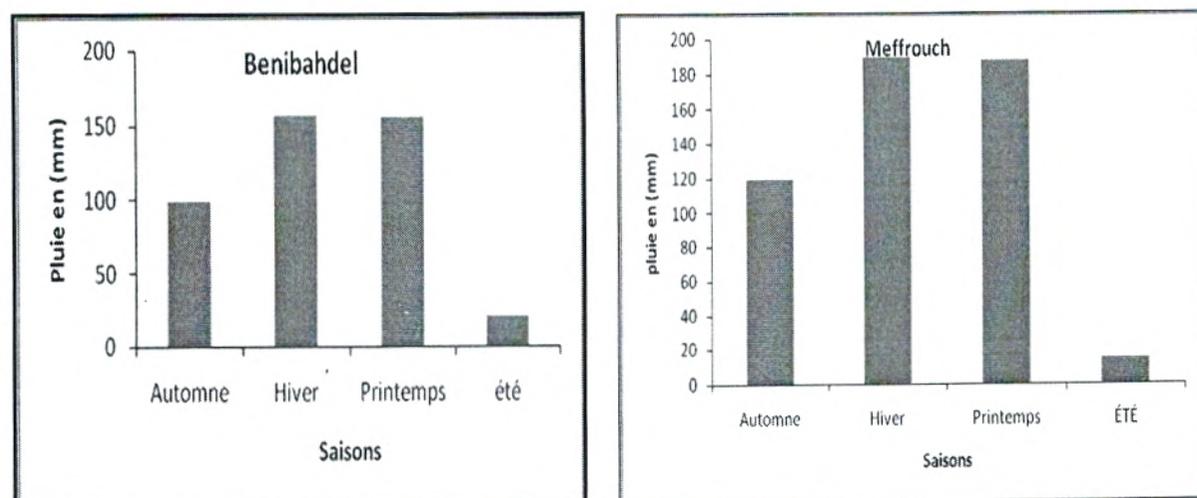


Figure 26: Variation des précipitations mensuelles des différents sous bassins

La distribution saisonnière représentée dans la figure 27 des trois sous bassins montre que l'Hiver et le printemps sont les saisons les plus humides, et l'été est la saison la plus sèche



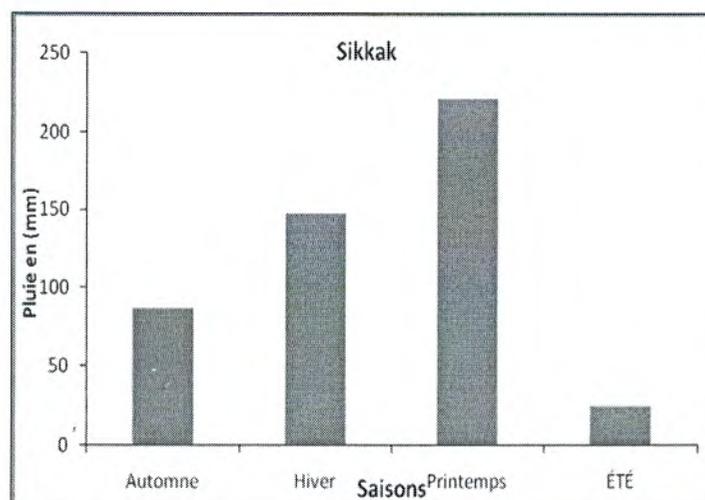


Figure 27 : Distribution des précipitations Saisonnières des différents sous bassins

Tableau 4 : Répartition des précipitations saisonnières

Saison	Automne (mm)	Hiver (mm)	Printemps (mm)	Eté (mm)
BeniBahdel	98.24	155.95	155.17	20.35
Meffrouch	119,06	189.56	187.41	14.87
Sikkak	87.1	147.37	221.19	24.88

III.2.1 Etude statistique

L'ajustement statistique consiste à vérifier des hypothèses d'homogénéité entre une variable aléatoire et un modèle calculé, si ce modèle est bien superposé à l'échantillon étudié, on peut dire qu'il est bien ajusté. L'objet de la méthode statistique est la réduction de la masse de données, qui si importante, devrait être remplacée par un nombre réduit de paramètres statistiques pouvant représenter correctement cette masse (DADI, 1998) in (Boukhari, 2004).

Afin de découvrir la structure des variations des débits et des précipitations annuels et pour faire une analyse détaillée de ces données, l'ajustement statistique a été réalisé grâce au logiciel Statistica7. Ce dernier propose les ajustements statistiques et détermine le modèle d'une loi ou plus qui ajustent au mieux l'ensemble des données. La méthode de calcul choisie pour l'estimation des paramètres du modèle est la méthode du maximum de vraisemblance.

L'ajustement graphique permet de vérifier si la forme de la loi retenue, ayant une valeur de test la plus petite, corrèle bien avec la distribution de la variable étudiée et représentent mieux l'échantillon. Le calcul les différents paramètres de la loi ou les lois choisies permettent enfin de déduire les variations futures de la variable pour une probabilité donnée.

L'étude statistique des modules présente un intérêt indéniable dans le cadre des projets d'aménagements hydrauliques et permet de compléter la connaissance du phénomène d'irrégularité de l'écoulement annuel.

- **Test de normalité :**

Pour tester la normalité des séries, il existe deux méthodes :

Test graphique : consiste à tracer sur un papier de Gauss la courbe théorique et la courbe empirique et de les comparer.

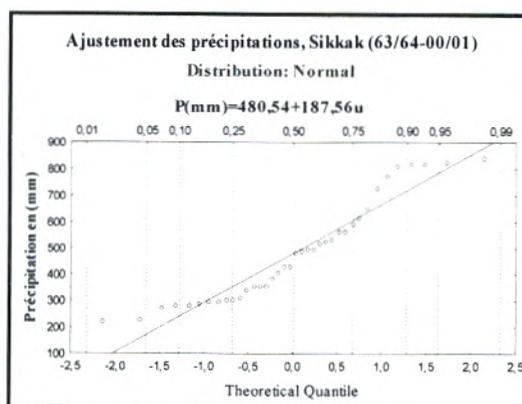


Figure 28: L'ajustement graphique des précipitations de chaque sous bassin.

III.3 Etude des débits (les lames d'eau écoulées) :

Pour cette étude, nous avons pris en considérations les valeurs annuelles et mensuelles des lames d'eau écoulées des stations des trois sous bassins (Beni bahdel, Meffrouch, et Sikkak).

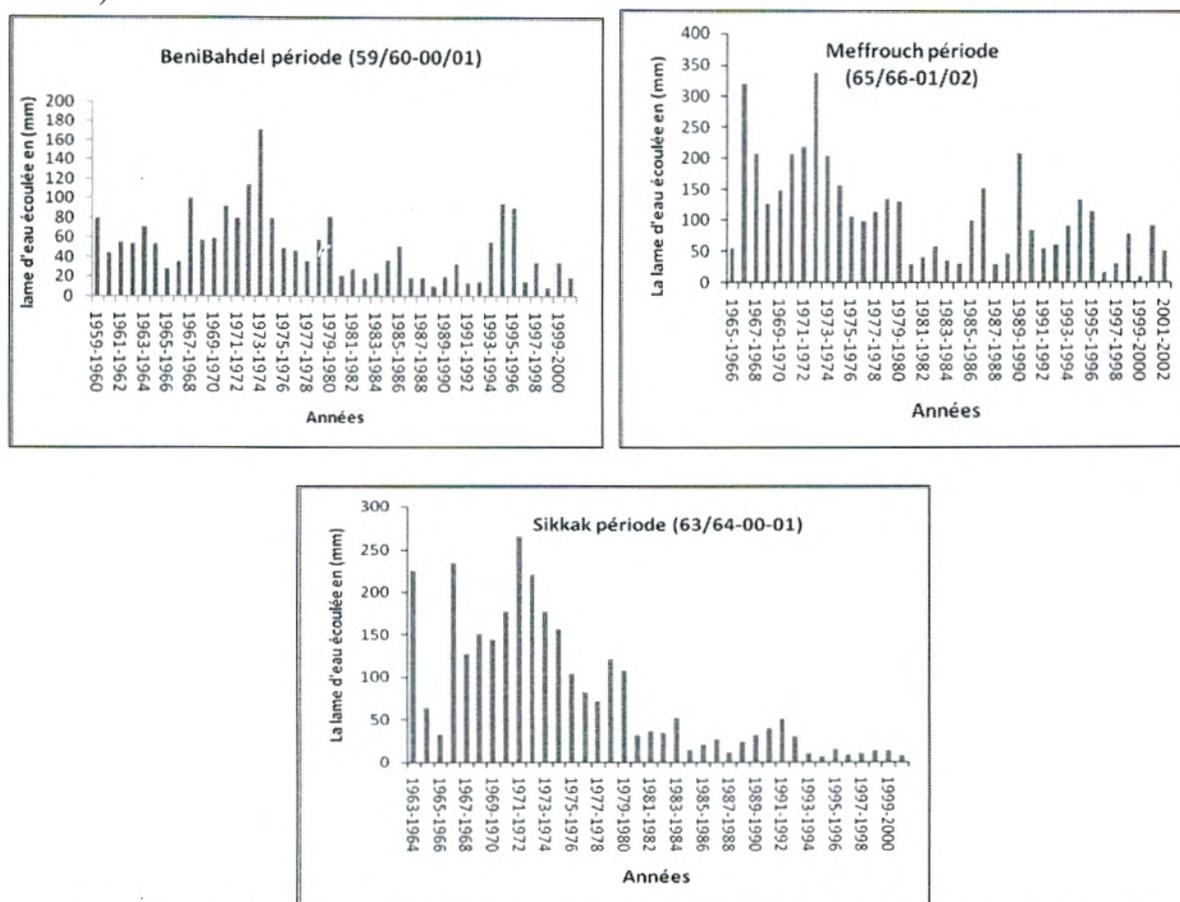


Figure 29: variation interannuelle des lames d'eau écoulées des différents sous bassins

La variation interannuelle des lames d'eau écoulées (figure 29), montre une diminution importante à partir de l'année 1973. La moyenne interannuelle des lames d'eau écoulées s'élève à 50.62 mm à la station de Beni Bahdel, elle est de 115.68mm pour le Meffrouche et de 104.03mm au niveau du Sikkak.

Les débits sont généralement faibles 0.9 mm avec un régime très irrégulier au cours de l'année, le maximum est atteint au mois de Mars (Printemps) à Beni Bahdel, et au mois d'Avril pour les deux sous bassin Meffrouche et Sikkak. Pendant les mois d'hiver, les cours d'eau recueillent des précipitations importantes et engendrent une augmentation du débit qui se poursuit pour atteindre son maximum au mois de mars et avril (le printemps). Au cours des mois d'été, les débits diminuent brutalement (période d'étiage) et les oueds sont pratiquement à sec.

En comparant les lames d'eau écoulées mensuelles des différents sous bassins, on constate que les sous bassins Sikkak et Meffrouch présentent des valeurs supérieures à celles de Beni Bahdel ; la surface de celui-ci étant plus importante et les précipitations moins abondantes. (Figure 30)

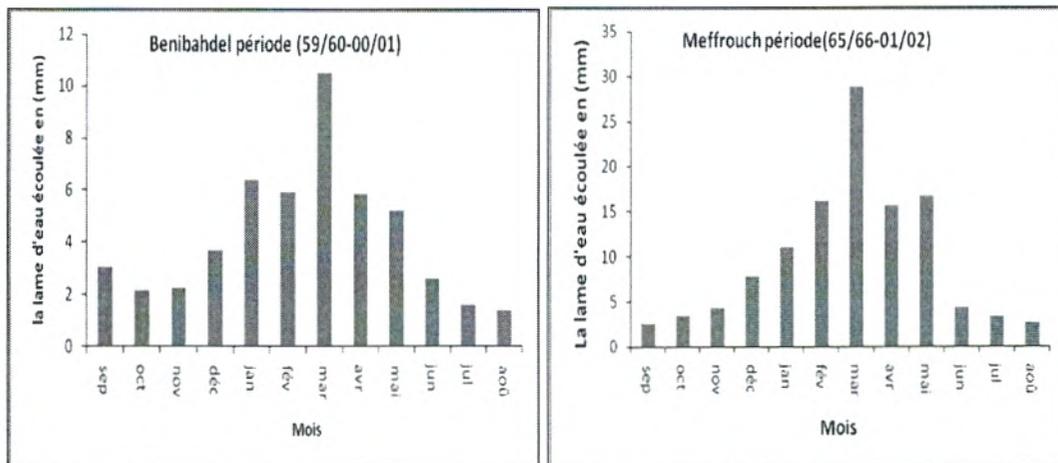


Figure 30 : variations des lames d'eau écoulées mensuelles des différents sous bassins

III.2.1. Ajustement des lames d'eau écoulées de chaque sous bassins :

• Test du χ^2

• Tableau 6 : Résultats du test du χ^2

Test d'erreurs = 5%	Khi 2 Calculé		Khi2 tabulé		Ajustement Probable
	Loi log normale	Loi normale	Log normale	Loi normale	
Beni Bahdel	1.079	1.56	3.84		La loi log normale
Meffrouch	0.37	1.45			La loi log normale
Sikkak	13.023	0.153	14.07	3.84	La loi normale

• Test Graphique

Contrairement au test du χ^2 , le test graphique montre que les précipitations relatives à nos stations s'ajustent mieux à une loi normale (figure 31).

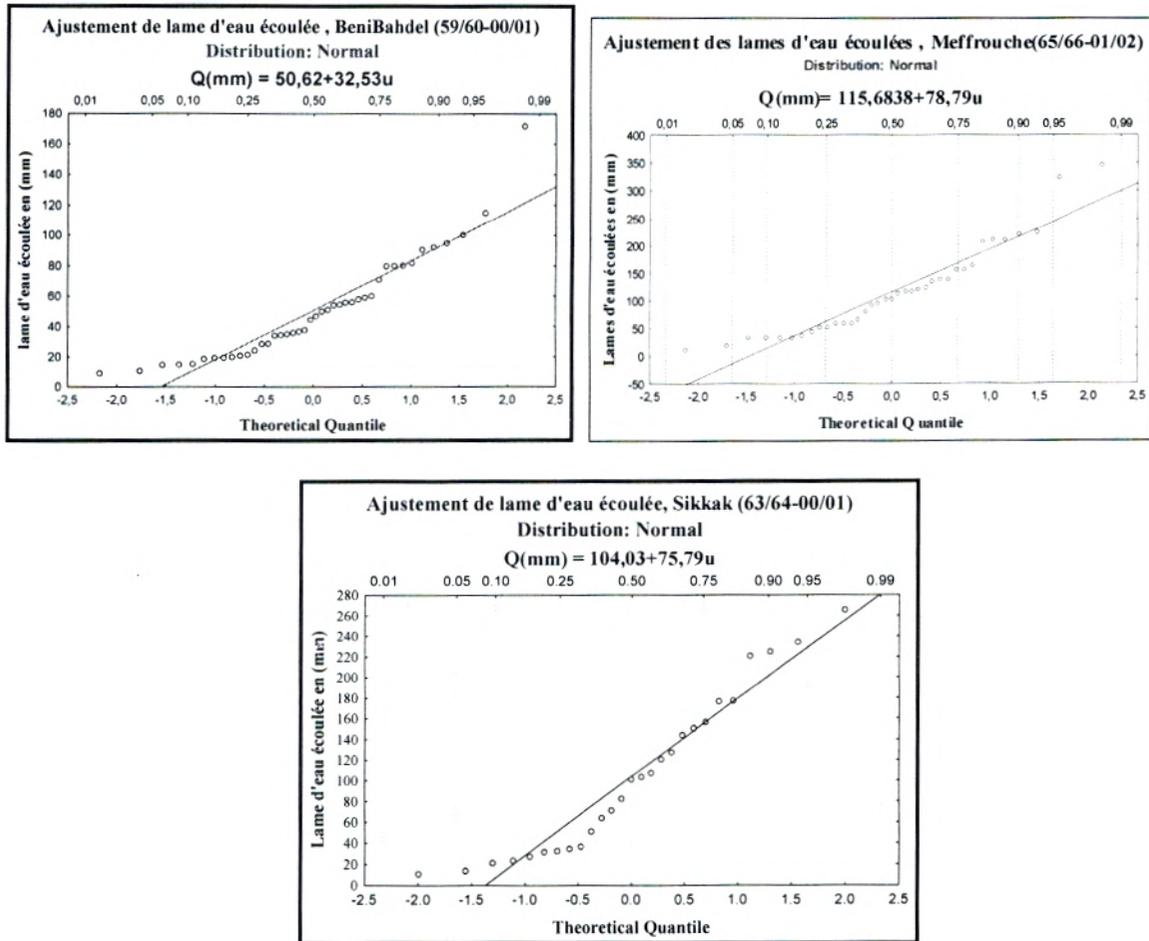


Figure 31: L'ajustement graphique des lames d'eau écoulées de chaque sous bassin

III.3 Etude de l'évapotranspiration potentielle

III.3.1 Etude des températures :

La température constitue un élément fondamental du climat. Elle est liée à la radiation solaire. La connaissance de leur variation est importante, puis qu'elle conditionne les phénomènes d'évaporation.

Nous avons utilisés les températures annuelles et mensuelles des stations de Beni Bahdel, Meffrouche et de Tlemcen pour Sikkak .

III.3.2 Températures annuelles :

La moyenne interannuelle des températures est de 18°C pour la station de Beni Bahdel , de $16,74^{\circ}\text{C}$ pour Meffrouche et $16,82^{\circ}\text{C}$ pour Tlemcen.

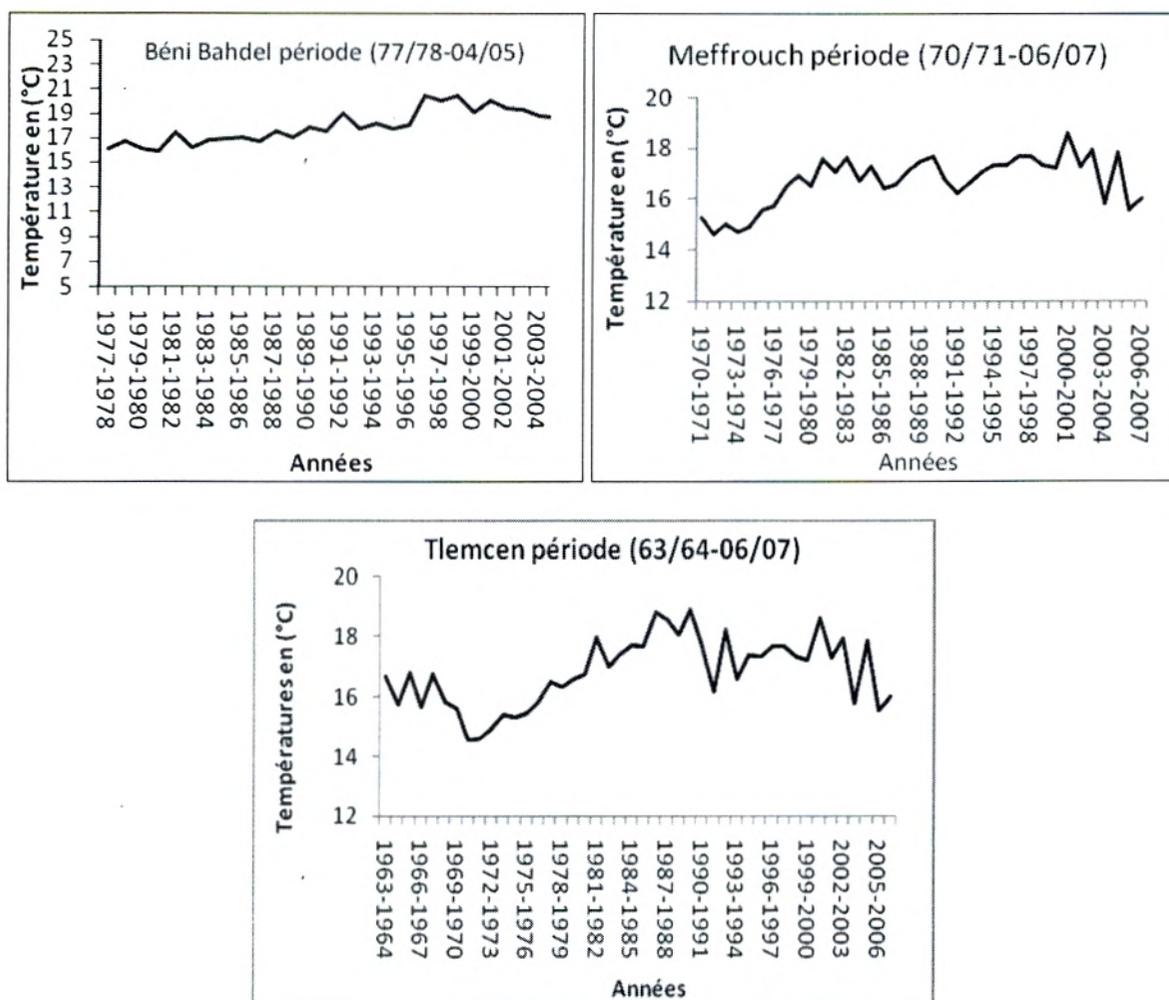


Figure 32 : Variation des Températures Annuelles (1964-2007).

Les courbes de la figure 32, montrent que les températures moyennes annuelles de différentes stations ont tendance à augmenter. Cette évolution suit celle constatée dans plusieurs endroits dans le monde. Faut-il lier ça au réchauffement climatique ?

III.3.3 Températures Mensuelles :

Tableau 7 : températures moyennes mensuelles de différentes stations

	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout	Année
BeniBahdel (1977 /2005)	23,2	20,5	13,5	10,4	10,1	11,2	13,6	15,7	19,1	23,9	28	26,9	18
Meffrouche (1971-2007)	19,9	16,5	12,9	11,5	10,6	12,3	14,1	15,0	18	20,7	24,6	24,6	16,73
Tlemcen (1964-2007).	22,33	18	13,8	11	9,8	10,6	13	13,8	17,1	22	25,5	25,4	16,86

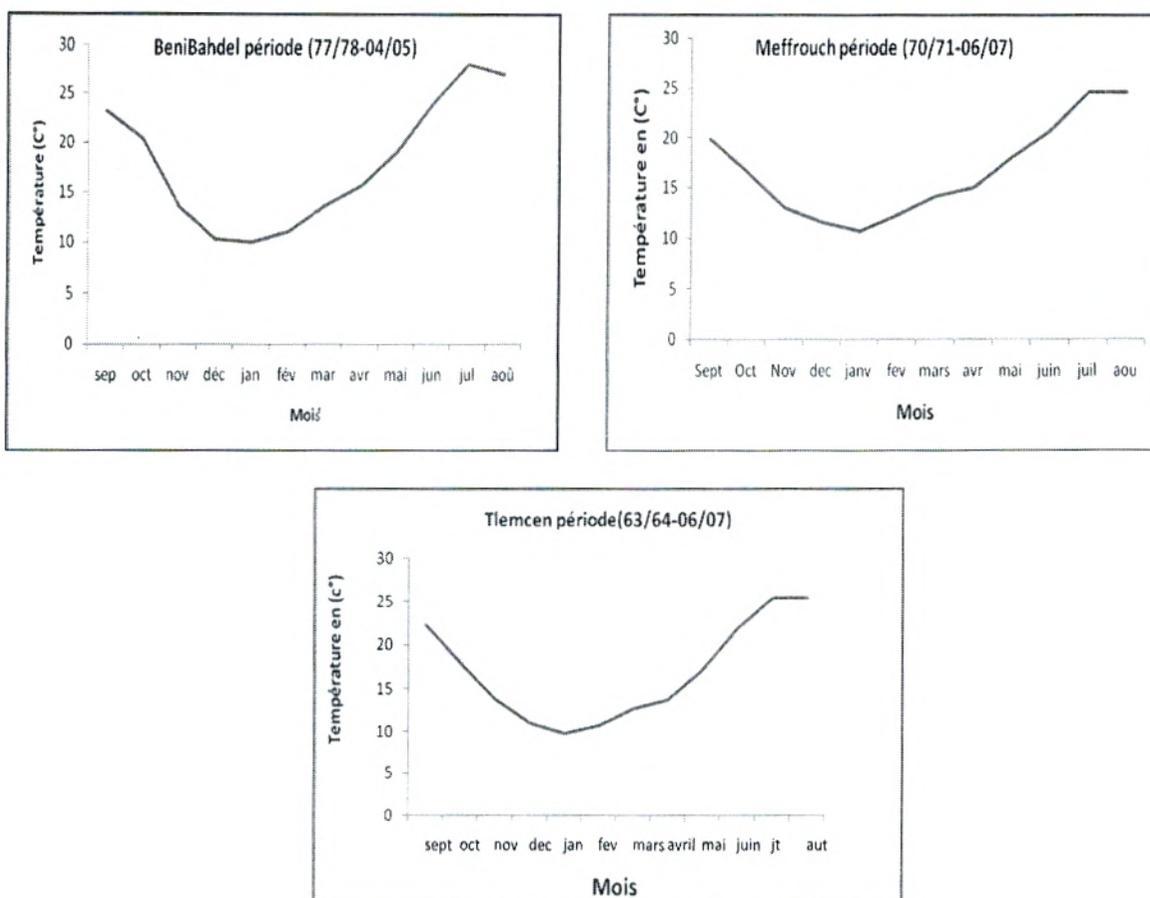


Figure 33 : variation des températures moyennes mensuelles

La température la plus basse est enregistrée au mois de Janvier et la plus élevée aux mois de Juillet et Août. (Figure 33)

III.3.2 Notion d'évapotranspiration réelle et potentielle :

On appelle évapotranspiration réelle (notée par la suite E_{tr}), la quantité d'eau, généralement exprimée en millimètres, évaporée ou transpirée par le sol, les végétaux et les surfaces libres d'un bassin versant.

L'évapotranspiration potentielle (notée par la suite E_{tp}) est la quantité d'eau qui serait évaporée ou transpirée à partir d'un bassin versant si l'eau disponible pour l'évapotranspiration n'était pas un facteur limitant.

II.3.2.1 Estimation de l'évapotranspiration :

Plusieurs formules permettent d'évaluer l' E_{tp} à partir de différentes mesures climatologiques. Pour notre cas nous avons utilisé les formules de Turc et Thornthwaite.

III.3.5.1 Formule de Turc :

La formule de Turc, qui dérive en la simplifiant de la formule de Penmann, ne nécessite que la connaissance des températures de l'air et de la radiation globale ou de la durée d'insolation. Cette formule est la suivante :

$$Etp = 0.4(Ig + 50)k \frac{t}{t + 15}$$

Avec :

Etp : évapotranspiration potentielle mensuelle (en mm d'eau) ;

T : température moyenne mensuelle de l'air (en °C) ;

Ig radiation globale moyenne mensuelle reçue au sol (en calorie/cm²/jour) ;

K un coefficient égal à 1 si l'humidité relative hr est supérieure à 50 % (généralement le cas sous nos climats) ;

Si non $K = 1 + \frac{50 - hr}{70}$

Si la radiation globale Ig n'est pas mesurée, on pourra l'évaluer à partir de la durée d'insolation h par la formule

$$Ig = IgA(0.18 + 0.62 \frac{h}{H})$$

Avec : IgA radiation globale théorique (en cal/cm²/jour) ;

H durées théoriques des jours du mois.

Pour le calcul de l'ETP par la méthode de Turc on a utilisé le programme élaboré par (Benadda,2000)

III.3.5.2 Formule de Thornthwaite

Thornthwaite a proposé également une formule basée essentiellement sur les températures de l'air :

$$E \quad ETP = 1,6 \left(\frac{10t}{I}\right)^\alpha \cdot K \quad \text{et}$$

$$I = \sum_1^{12} i \quad \text{avec } i = \left(\frac{t}{5}\right)^{1,514}$$

$$\alpha = \frac{1,6}{100} I - 0,5$$

t : température moyenne mensuelle du mois considéré ;

Etp : évapotranspiration potentielle du mois considéré (en mm d'eau) ;

K : est un coefficient d'ajustement mensuel en fonction de la latitude et la durée du jour.

Cette méthode est largement utilisée mais tend à surestimer les valeurs d'ETP, particulièrement en période estivale, probablement à cause du rôle prépondérant occupé par la température (Shaw, 1994; In Oudin, 2004).

Toutefois, cette formule est particulièrement intéressante car le terme de température est normalisé par un terme moyen de température. Cette normalisation de la température permet de différencier l'impact des fortes températures en milieu chaud et en milieu froid.

Sur le plan de l'évapotranspiration, on s'intéressera à l'évaporation calculée par l'application des formules de Turc (programme élaborée par Benadda, 2000) et Thornthwaite. Ces calculs sont réalisés par l'utilisation de séries de températures moyennes mensuelles mesurées au niveau des stations de Beni-Bahdel (1977/2005), Mefrouche (1970-2007) et Tlemcen (1963-2007). (Tableaux en annexes).

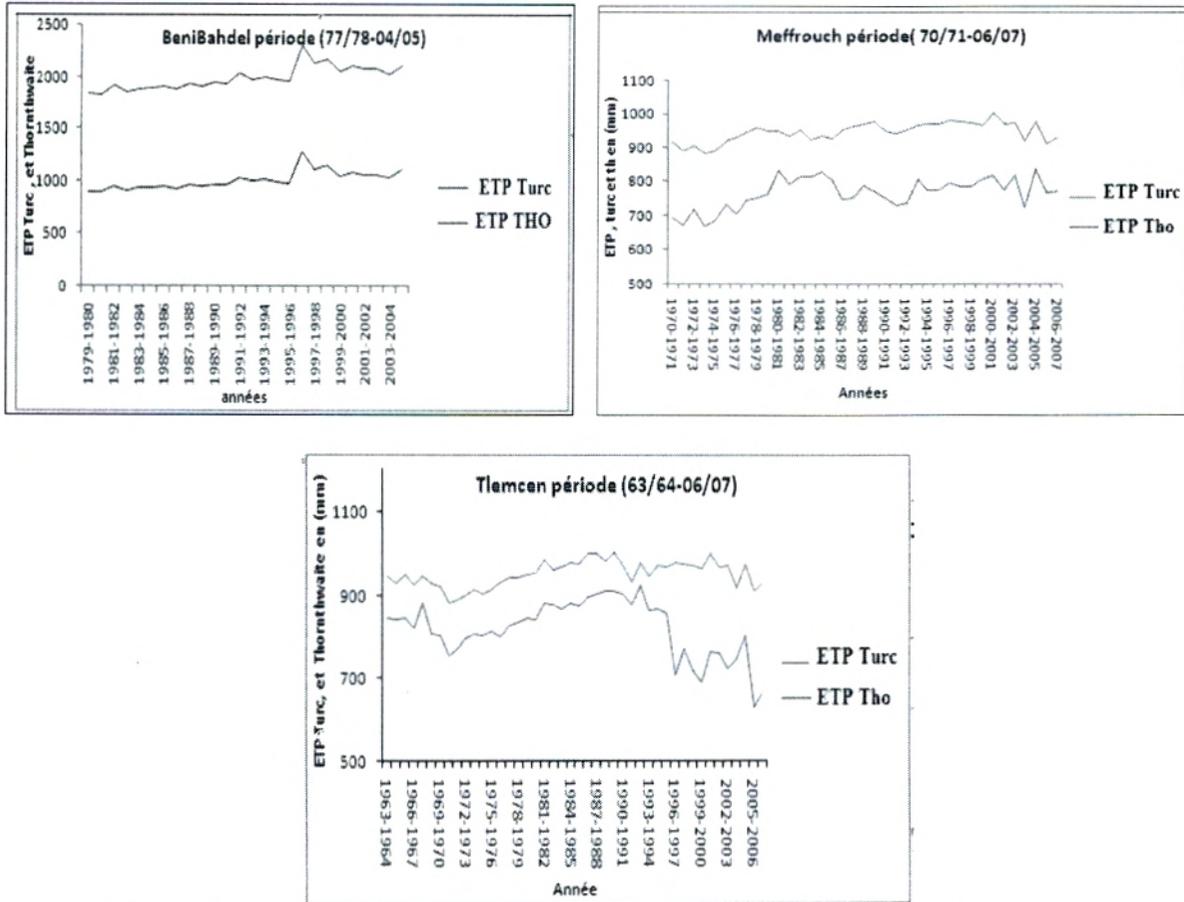


Figure 34: variation des ETP Turc et Thornthwaite pour les trois sous bassins

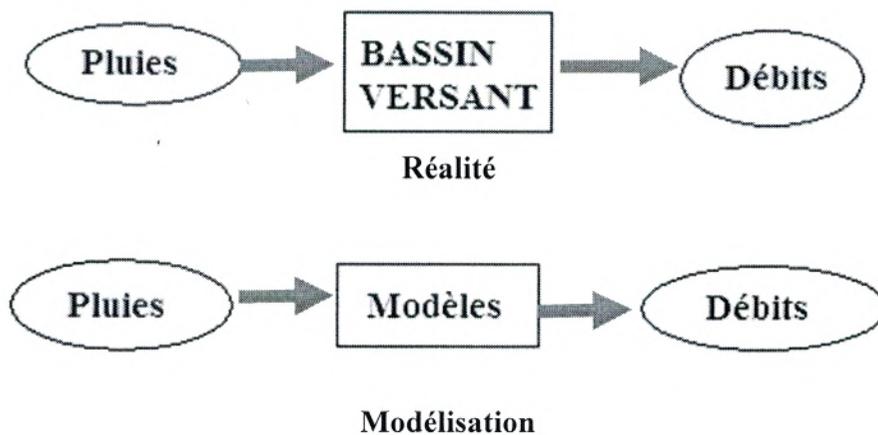
Les courbes de la figure 34 montrent que les valeurs annuelles de l'ETP de Turc sont supérieures à celles de l'ETP de Thornthwaite d'une part et que l'évapotranspiration a tendance à une stabilisation si non à une diminution (station de Tlemcen) durant cette dernière décennie d'autre part. Cela peut s'expliquer par les baisses des températures et l'augmentation de la pluviométrie et de l'humidité ces dernières années.

CHAPITRE IV

MODELISATION PLUIE – DEBIT

Introduction :

Très souvent, il y a insuffisance de données de débits alors que les données pluviométriques sont généralement abondantes. Il apparaît donc nécessaire, en vue d'une meilleure gestion des ressources en eau par une connaissance plus précise des quantités d'eau disponible, de transformer les données pluviométriques en données hydrométriques. D'où l'intérêt de la modélisation pluie-débit basée sur l'utilisation de modèles simulant la réalité.



Avant l'application du modèle Génie Rural annuelle et mensuelle nous avons essayé une corrélation simple entre les précipitations et les lames d'eau écoulées pour chaque bassin.

On distingue deux types principaux de corrélations :

- **Corrélation orthogonale :**

La corrélation orthogonale correspond à l'un des axes principaux d'inertie de la masse de la distribution. D'après le théorème de Steiner, la droite doit passer par le centre de gravité de la masse (point O) (Llamas, J 1934)

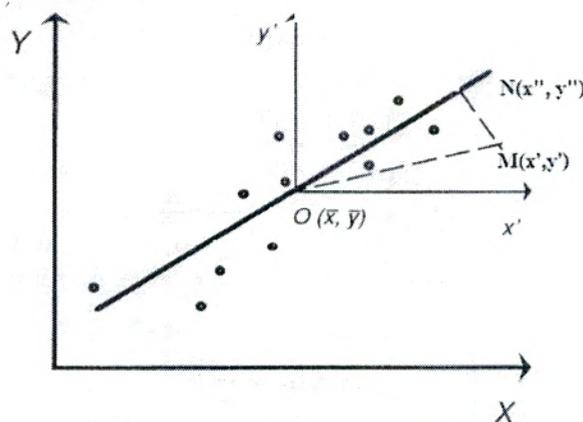


Figure 35 : régression orthogonale (J ; Llamas, 1934)

- **Corrélation linéaire :**

On peut considérer deux cas, suivant les distances mesurées parallèlement à l'axe Y ou à l'axe X.

- **Autre types de corrélation :**

Il arrive souvent que les points représentant les variables X et Y ne soient pas visiblement alignés sur une droite, mais que la direction générale des points représente une autre courbe de régression différente, ou bien transformer les variables originales de façon telle que les points correspondant aux nouvelles variables soient sensiblement alignés, et il convient alors d'appliquer la méthode de régression linéaire. (Llamas, J 1934)

IV.1 Modèles corrélatoires entre les deux paramètres pluie et la lame d'eau écoulée

IV.1.1 La corrélation annuelle

Tableau 8 : les résultats des différentes corrélations entre les deux paramètres pluie et la lame d'eau écoulée annuelles

	Beni Bahdel	Meffrouch	Sikkak
Linéaire	$Q=0.106P-8.363$ $R^2=0.19$	$Q=0.227P-14.17$ $R^2=0.4$	$Q=0.308P-64.06$ $R^2=0.67$
Logarithmique	$Q=36.84\ln(P)-185.6$ $R^2=0.17$	$Q=85.45\ln(P)-42.10$ $R^2=0.30$	$Q=142.7\ln(P)-786.2$ $R^2=0.62$
Puissance	$Q=0.024P^{1.179}$ $R^2=0.21$	$Q=0.296P^{0.911}$ $R^2=0.31$	$Q=0.0001P^{1.829}$ $R^2=0.64$
Exponentiel	$Q=7.45e^{0.003P}$ $R^2=0.21$	$Q=7.45e^{0.003P}$ $R^2=0.21$	$Q=9.161e^{0.003P}$ $R^2=0.65$
Polynomiale	$Q=0.00021P^2-0.178P+42.40$ $R^2=0.20$	$Q=0.00012P^2-0.099P+60.27$ $R^2=0.44$	$Q=0.00015P^2+0.109P-17.93$ $R^2=0.68$

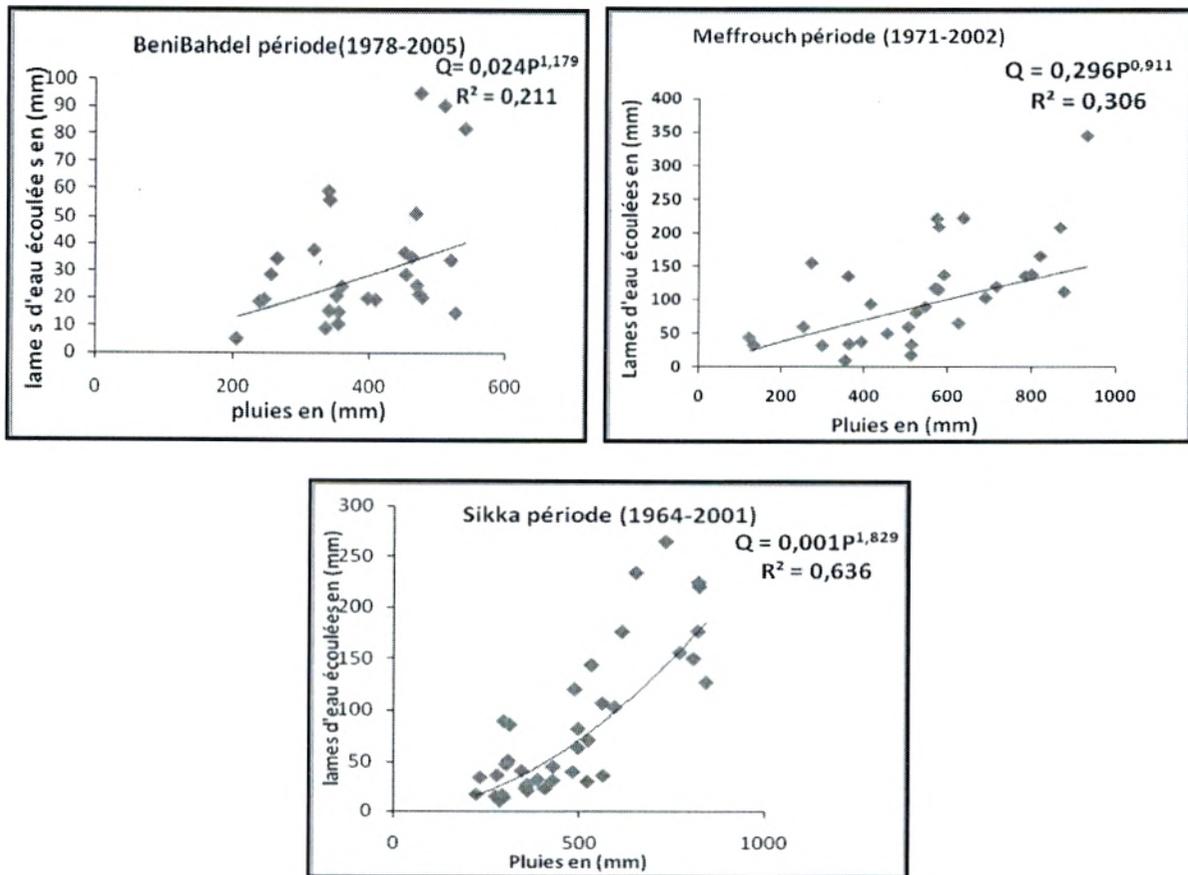


Figure 36: Les Corrélations entre les lames d'eau écoulées et les pluies annuelles, des différents bassins

V.1.2 La corrélation mensuelle

Tableau 9 : les résultats des différentes corrélations entre les deux paramètres pluie et la lame d'eau écoulée mensuelle ci dessous:

	Beni Bahdel	Meffrouch	Sikkak
Linéaire	$Q=0.048P+1.360$ $R^2=0.13$	$Q=0.101P+4.496$ $R^2=0.09$	$Q=0.013P+9.173$ $R^2=0.02$
Logarithmique	$Q=0.836\ln(P)+0.689$ $R^2=0.06$	$Q=2.563\ln(P)+1.750$ $R^2=0.06$	$Q=0.37\ln(P)+9.670$ $R^2=0.10$
Puissance	$Q=0.460P^{0.402}$ $R^2=0.22$	$Q=1.925P^{0.237}$ $R^2=0.11$	$Q=1.941P^{0.174}$ $R^2=0.40$
Exponentiel	$Q=0.943e^{0.011P}$ $R^2=0.11$	$Q=2.616e^{0.008P}$ $R^2=0.13$	$Q=2.79e^{0.03P}$ $R^2=0.17$
Polynomiale	$Q=0.0001P^2-0.033P+2.606$ $R^2=0.20$	$Q=0.00005P^2+0.097P+4.587$ $R^2=0.13$	$Q=0.00002P^2-0.035P+9.609$ $R^2=0.3$

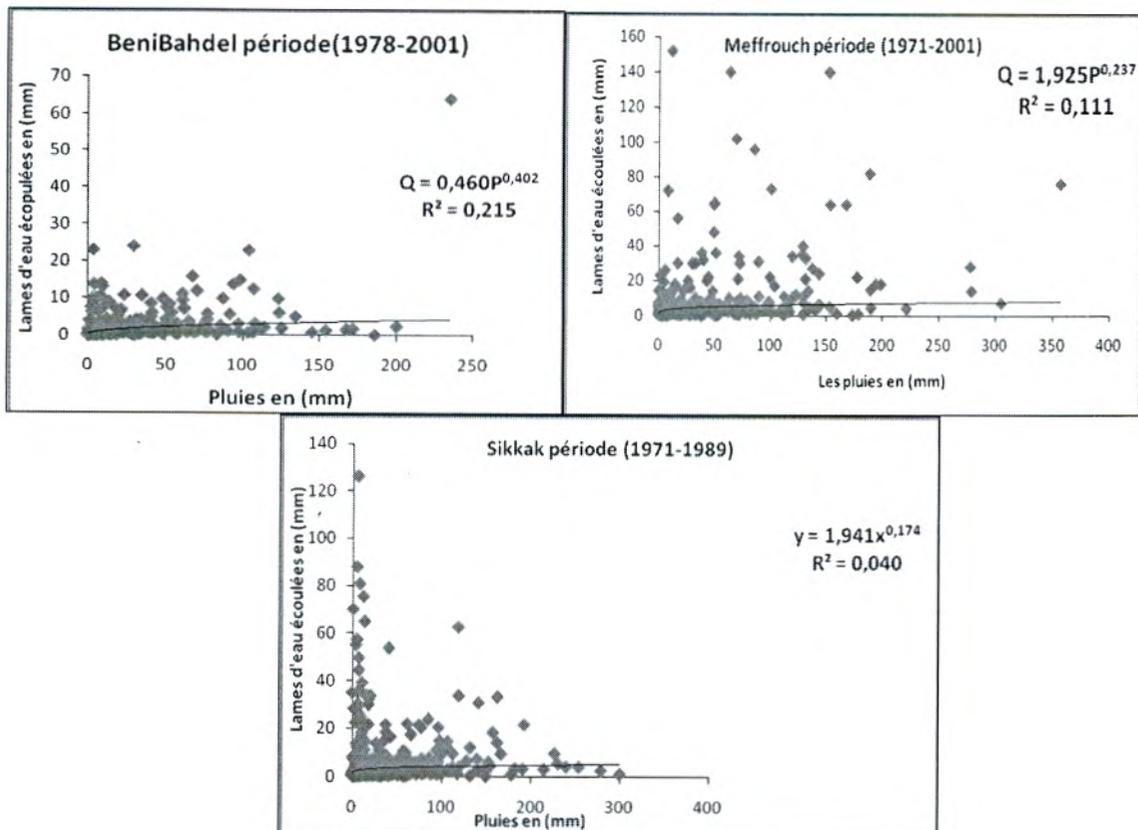


Figure 37: Les Corrélations entre les lames d'eau écoulées et les pluies mensuelles, des différents bassins

Les tableaux 8 et 9 présentent les différentes corrélations pluie et la lame d'eau écoulée annuelles et mensuelles des trois sous bassin, parmi ces modèles nous avons choisi de représenter les modèles puissances mentionnés dans les figures 36 et 37.

Les Corrélations entre les lames d'eau écoulées et les pluies montrent de mauvaises relations mensuelles avec des coefficients de corrélation inférieurs à 0,50 pour tous les sous bassins. Ceci peut s'expliquer par le fait que l'écoulement enregistré dans le mois k ne correspond pas forcément aux pluies tombées au même mois.

Les écoulements de surface peuvent en effet être soutenus par les écoulements souterrains dus aux pluies du mois ou des mois précédents.

Les caractéristiques physiques, la taille, la géologie, et la structure du bassin associées à l'intensité, et la répartition spatio-temporelle des précipitations constituent les principaux facteurs qui conditionnent le phénomène.

En effet, nous obtenons de meilleures corrélations au niveau du bassin du Sikkak moins karstique que les deux autres bassins et présente donc moins de pertes souterraines.

Les données annuelles présentent de meilleures corrélations, en effet la compensation et la régulation de l'écoulement dans le temps, améliorent la correspondance avec les précipitations.

Toutefois, le bassin du Meffrouche présente toujours de faibles résultats. Le caractère karstique les pertes et transferts souterrains vers d'autres bassins versants peuvent constituer la principale cause.

Les résultats de cette modélisation par la recherche de relations pluie – lame d'eau écoulée à l'aide de corrélations simples ne semblent pas être convaincants et ne peuvent être utilisés pour des fins de prévision d'aménagement.

En effet, ces modèles sont trop simples et ne tiennent pas compte d'autres paramètres qui régissent l'écoulement en particulier les échanges avec l'atmosphère et les réservoirs souterrains. Aussi et dans la suite du travail, nous proposons d'utiliser un modèle qui prendra compte de ces échanges

IV.2 Application le modèle GR :

Les modèles du Génie Rural du fait de leur construction, ne peuvent être que parcimonieux (peu de paramètre à caler), Par suit ; ils ont des besoins en données limités, dans un domaine où les modèles tendent à devenir de plus en plus complexes pour intégrer des processus supposés exister à l'échelle ponctuelle.

Les modèles GR ont été testés sur des bassins et des contextes climatiques très variés, en France mais aussi dans d'autres pays (Etats-Unis, Australie, Brésil, Allemagne, Algérie, Côte d'Ivoire, etc.).

Applicables à l'échelle du bassin versant, ils ont été testés sur des bassins versants allant de moins de 10 Km² à plus de 100 000 Km². Ils sont également utilisés pour une large gamme d'applications opérationnelles telles que la prédétermination des crues, la prévision des crues et d'étiage, la détection d'impact, la gestion ou dimensionnement d'ouvrage.

IV.2.1 Modèle annuel GR1A :

Dans cette étude, pour prédire le débit à une année donnée on utilise à l'entrée du modèle des valeurs des pluies annuelles observées (mm), des ETP calculées par la méthode de Turc et même la méthode de Thornthwaite (mm) et des débits annuels (exprimés en lames d'eau écoulées) observés pour chaque sous bassins.

IV.2.1.1 Résultat du calage :

Dans un premier temps, on fait tourner le modèle en calage seulement sur la totalité de la période définie dans le tableau ci-dessous de chaque sous bassins. Nous avons procédé à des changements sur le paramètre X du modèle en commençant par la valeur 0.13 (valeur minimale donnée par le concepteur du GR1A) et la faisant accroître successivement avec un intervalle de 0.01 jusqu'à la valeur supérieure limite donnée par le modèle 3.5. Nous avons obtenue le meilleur calage avec des valeurs du paramètre X présentées dans le tableau 10.

La validation du calage est effectuée en appliquant le test de performance du modèle de coefficient de détermination R^2 (tableau 10).

IV.2.1.2 Résultats du calage du modèle annuel en utilisant l'ETP par la méthode Turc, et la méthode Thornthwaite

Tableau 10: Valeurs des paramètres après calibration et performances des 3 sous bassins

Données annuelles	ETP(Turc)				ETP(Thornthwaite)			
	X	Nash	Bilan	Coefficient de corrélation (R ²)	X	Nash	Bilan	Coefficient de corrélation (R ²)
BeniBahdel (1977-1996)	1.31	91.6%	99.6%	0.905	1.17	93.2%	98.5%	0.90
Meffrouch (1970-1995)	1.14	92.8%	90.7%	0.948	1.36	96%	103.7%	0.954
Sikkak (1963-1989)	1.16	96%	91.7%	0.976	1.22	93.6%	93.4%	0.948

X : Coefficient de correction de l'ETP (mm) (évapotranspiration potentiel)

1. BeniBahdel :

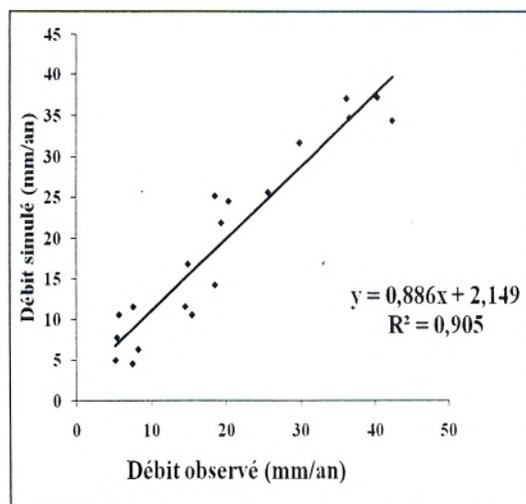


Figure 38 : Corrélation entre les débits observés et les débits simulés

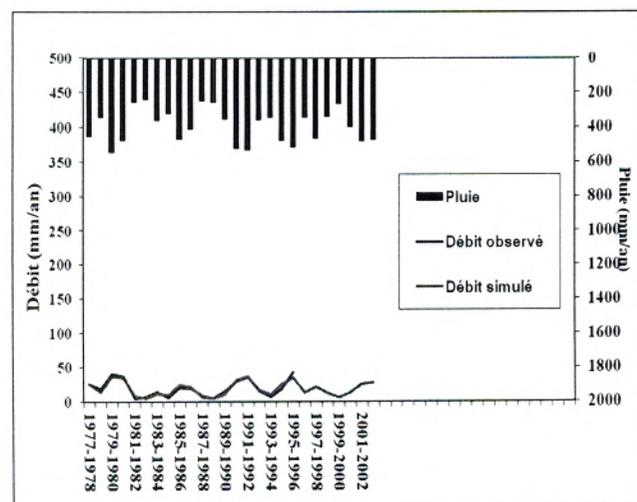


Figure 39 : Visualisation de la qualité du calage

ETP de Turc

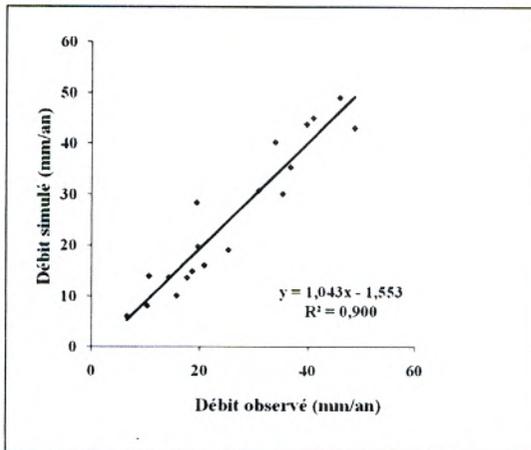


Figure 40 : Corrélation entre les débits observés et les débits simulés

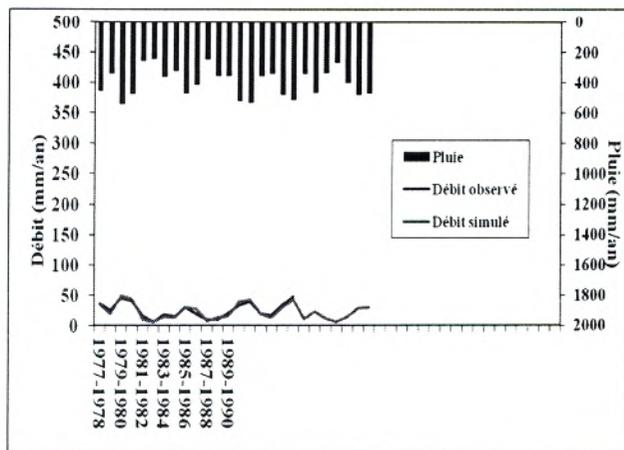


Figure 41: Visualisation de la qualité du calage

ETP de Thornthwaite

2. Meffrouche :

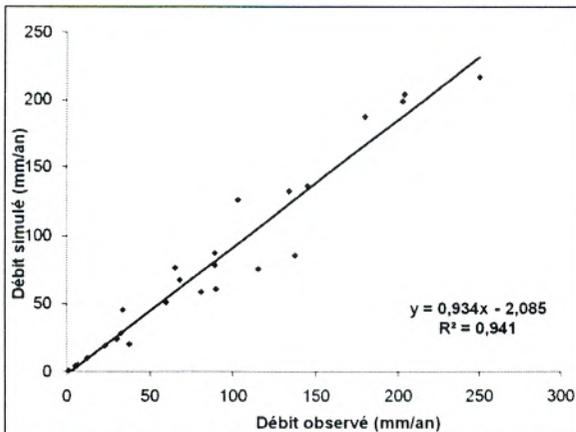


Figure 42: Corrélation entre les débits observés et les débits simulés

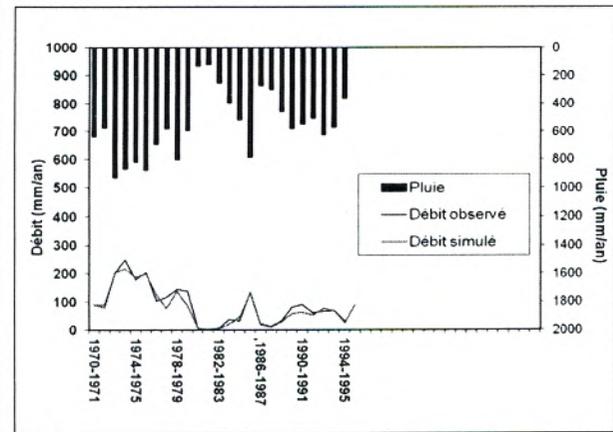


Figure 43: Visualisation de la qualité du calage

ETP de Turc

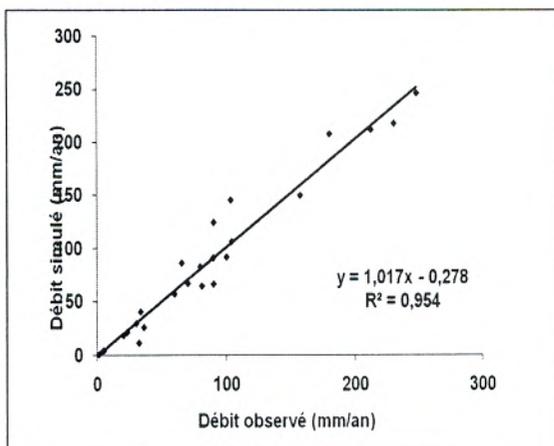


Figure 43: Corrélation entre les débits observés et les débits simulés

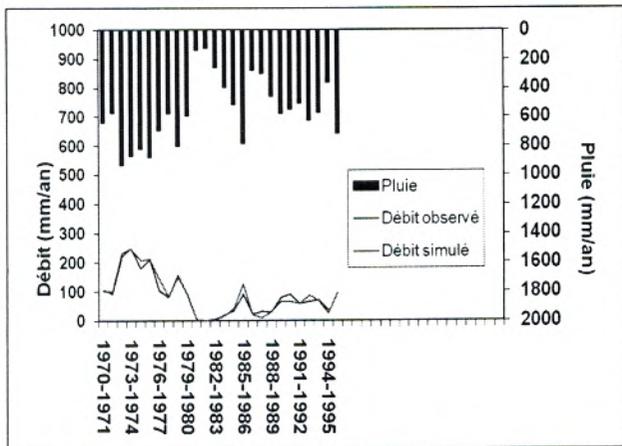


Figure 44 : Visualisation de la qualité du calage

ETP de Thornthwaite

3. Sikkak

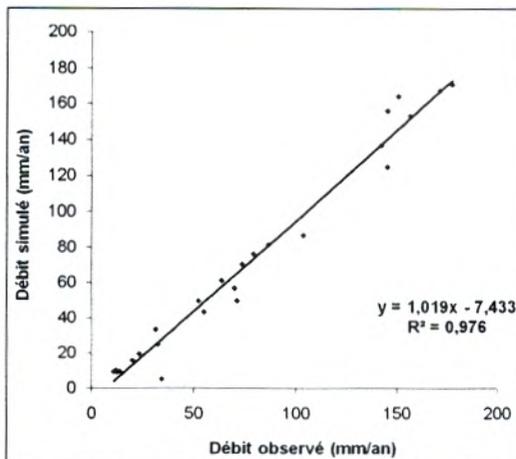


Figure 45 : Corrélation entre les débits observés et les débits simulés

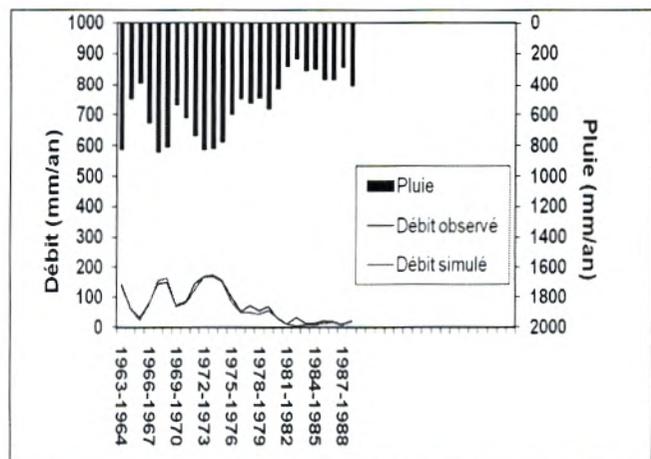


Figure 46: Visualisation de la qualité du calage

ETP de Turc

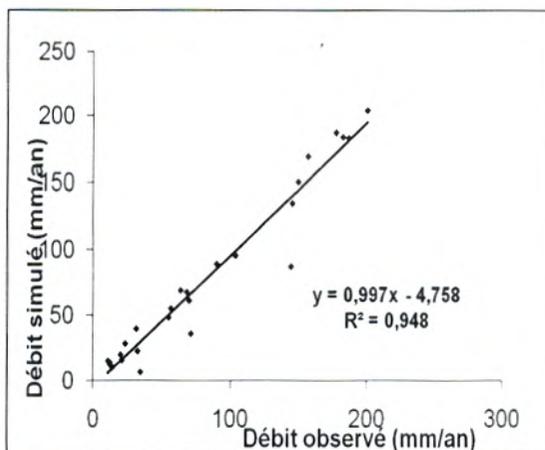


Figure 47: Corrélation entre les débits observés et les débits simulés

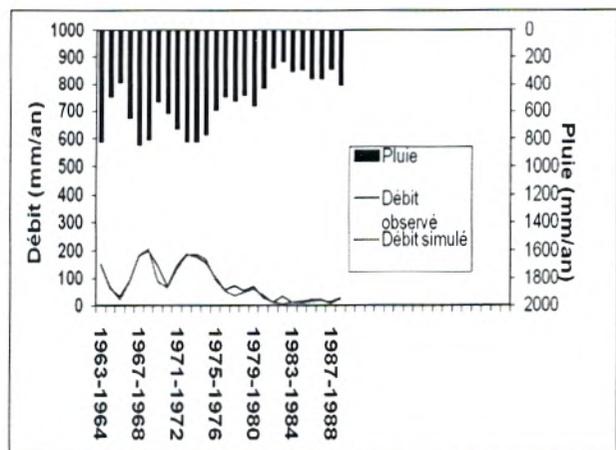


Figure 48: Visualisation de la qualité du calage

ETP de Thornthwaite

Au regard des valeurs des coefficients de détermination, le calage paraît correcte pour l'ensemble des trois sous bassins. Les valeurs de Nash après calage sont plutôt bonnes comprises entre 91.6% et 96.4% (tableau 14).

Les courbes des lames d'eau écoulées calculés et celles mesurées indiquent des superpositions presque parfaites pour les trois bassins (figure n°44,46,48, 50,52,54). Les bilans sont assez équilibrés variant entre 93.4% et 103.7% (tableau 10).

Le paramètre X qui traduit l'influence d'une ouverture du bassin sur l'extérieur non atmosphérique montre que pour la valeur de $1.31 > 1$, le bassin de Beni Bahdel perd de l'eau en profondeur vers les nappes du jurassique ou vers d'autres bassins versants adjacents. Ceci confirme les résultats trouvées par (K. Baba Hamed, et Kerzabi : 1991). Les valeurs de

$X=1.14$ trouvées pour le Meffrouche et 1.16 pour Sikkak indiquent aussi que ces bassins perdent de l'eau. En effet, le caractère karstique de ces bassins nous laisse penser qu'il existe des échanges de l'amont à partir du Meffrouche vers le Sikkak à l'aval.

En effet le bassin du Sikkak reçoit les eaux issues d'Oued Nchef (Bassin Meffrouche) par l'intermédiaire des nombreuses sources en aval du barrage du Meffrouche (cascade de l'Ourit). Les eaux transitent par failles dans les dolomies de Terny du bassin du Meffrouche pour sortir en aval sous le barrage

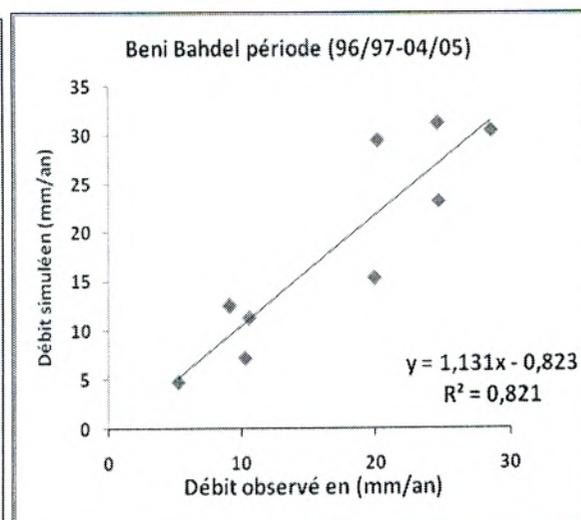
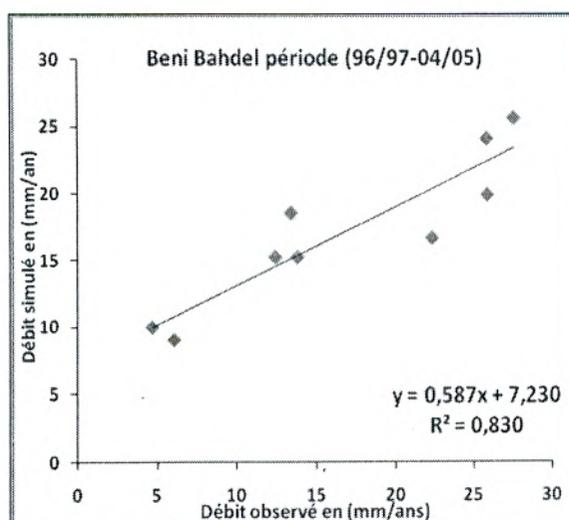
IV.2.1.3 Validation du modèle annuel :

La validation porte sur l'application des modèles sur une série de données qui n'ont pas été utilisées lors du calage. Le tableau 11 et la figure 49 présentent les résultats de cette validation.

Le tableau 11 si dessous donne les variations du coefficient de corrélation avec l'utilisation des deux méthodes (Turc, Thornthwaite) pour l'évapotranspiration. Ces valeurs de $R^2 > 0,81$ indiquent que les modèles sont bien calés.

Tableau n°11 : les variations de coefficients de corrélation

	Coefficient de corrélation (R^2)	
	ETP (Turc)	ETP(Thornthwaite)
BeniBahdel	0.83	0.821
Meffrouch	0.856	0.866
Sikkak	0.945	0.93



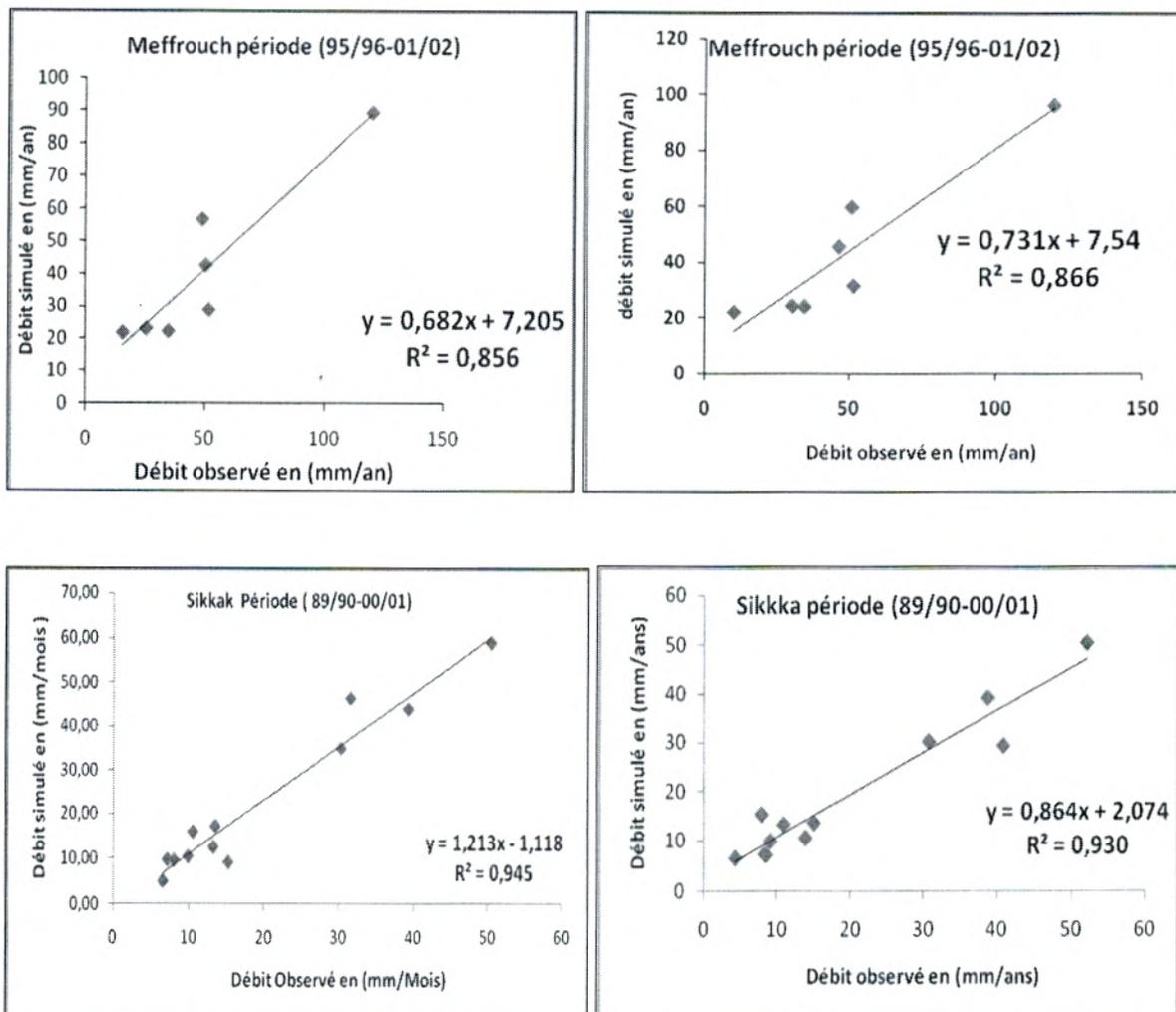


Figure 49 : Validation de modèle GR1A des trois sous bassins

IV.2.2. Modèle Mensuel GR2M :

Dans cette étude, pour prédire le débit à un mois donné nous avons utilisé à l'entrée du modèle des valeurs des pluies mensuelles observées (mm), des ETP calculées par la méthode de Turc (mm) et des débits mensuels observés exprimés en lames d'eau écoulées (mm).

IV.2.2.1 Résultat du calage :

Le calage des modèles a été réalisé après plusieurs passages sur ordinateur (une centaine de simulation). Nous avons procédé aux changements des valeurs des paramètres X_1 et X_2 du modèle entre les valeurs limites comprises entre 140 et 2640 (mm) jusqu'à l'obtention des valeurs optimum des coefficients de détermination, et le critère de Nash. Les résultats du calage, coefficient de détermination, et critère de Nash sont présentés dans le tableau 12. Le calage du Modèle GR2M a été relativement plus difficile par rapport au GR1A.

IV.2.2.2 Résultats du calage du modèle mensuel en utilisant l'ETP par la méthode Turc et Thornthwaite

Tableau 12: Valeurs des paramètres après calibration et performances des 3 sous bassins

Critères		BeniBahdel(77-89)	Meffrouch(70/82)	Sikkak(63/75)
ETP Turc	X ₁	2440.60	2591.52	897.85
	X ₂	0.92	0.80	1.00
	Nash	85.1%	85.4%	86.5%
	Bilan	96.7%	112%	102%
	R ₀	20	10	20
	R ²	0.973	0.88	0.886
ETP Thornthwaite	X ₁	2565	2591.52	1808.04
	X ₂	0.86	0.66	0.80
	Nash	84%	86.1%	83%
	Bilan	85.5%	102.4%	106.2%
	R ₀	20	10	20
	R ²	0.968	0.871	0.848

X₁ Capacité réservoir de Production (mm)

X₂ : Paramètre d'échange (mm)

R₀ Niveau de remplissage initial (max.: 60 mm)

R² : Coefficient de corrélation

D'après les valeurs des coefficients de détermination et de Nash (tableau 12), le calage paraît correct pour l'ensemble des trois sous bassins.

Les courbes des lames d'eau écoulées calculées et celles mesurées semble assez bien superposées pour les trois sous bassins de la Haute Tafna à Beni bahdel, Meffrouche, et Sikkak.

La valeur du paramètre X₁ (tableau 12) de Beni Bahdel et Sikkak inférieure à celle de Meffrouche peut indiquer que la partie infiltrée est plus importante au niveau du bassin Meffrouche que celle respectivement du Sikkak et Beni Bahdel ce qu'implique un processus de ruissellement superficiel plus rapide au niveau du Sikkak et BeniBahdel. Ceci s'explique par le faite que le bassin du Meffrouche est plus Karstique que les deux autres.

Les paramètres d'échange X₂ qui traduit l'influence d'une ouverture du bassin sur l'extérieur non atmosphérique et relié par le réservoir de routage. (Les figures 50, 51, 52, 53, 54, 55) indiquent les niveaux de réservoir de routage, pour chaque sous bassin.

1. BeniBehdel

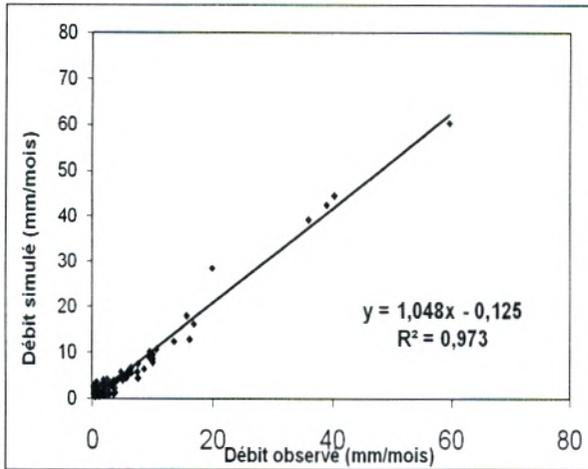


Figure 50: Corrélation entre les débits observés et les débits simulés

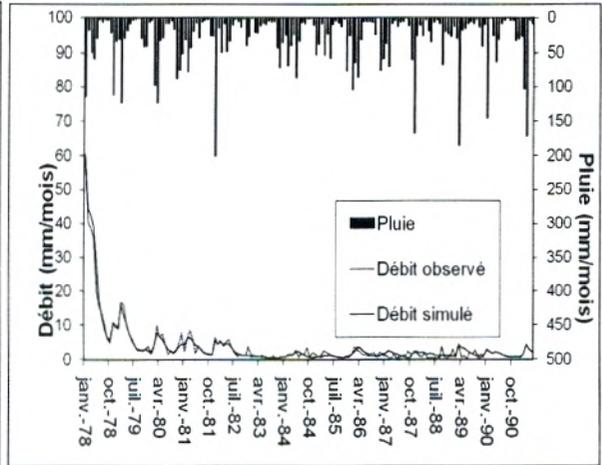


Figure 51: Visualisation de la qualité du calage

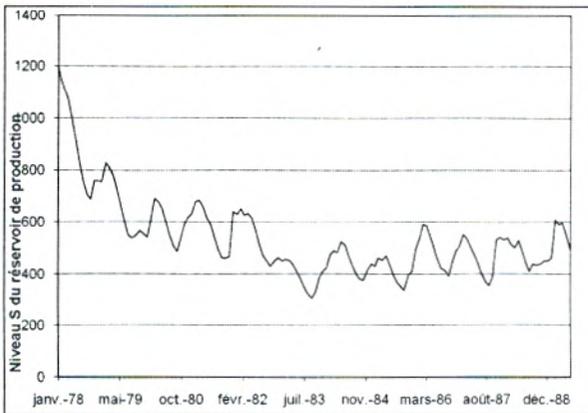


Figure 52: Courbe indique le niveau S du réservoir production

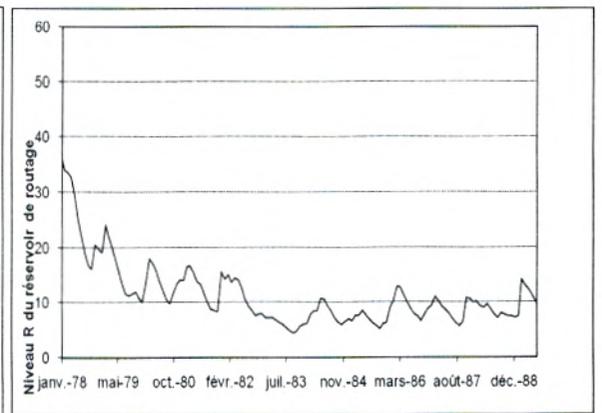


Figure 53: Courbe indique le niveau R du réservoir de routage

ETP de Turc

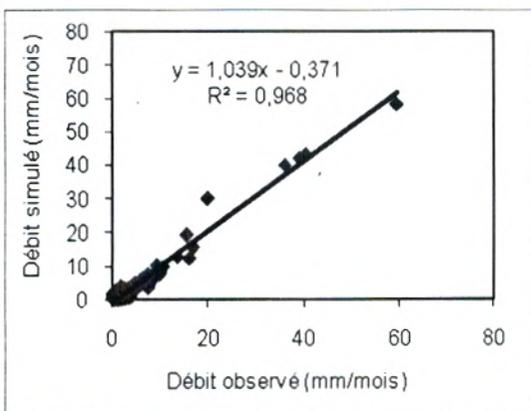


Figure 54 : Corrélation entre les débits observés et les débits simulés

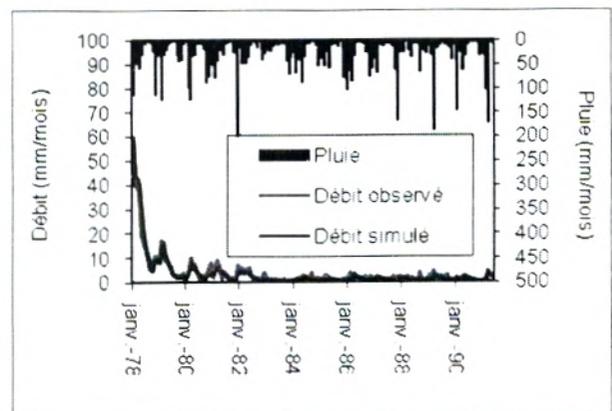


Figure 55: Visualisation de la qualité du calage

ETP Thornthwaite

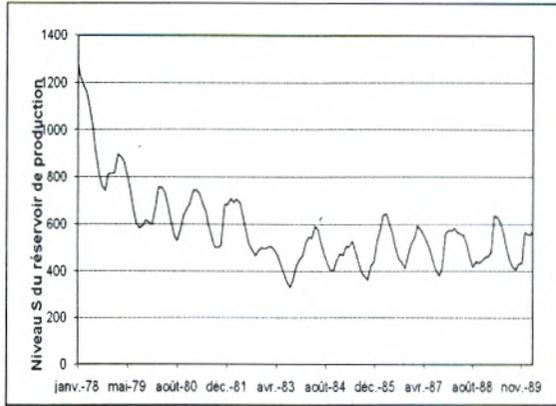


Figure 56: Courbe indique le niveau S du réservoir production

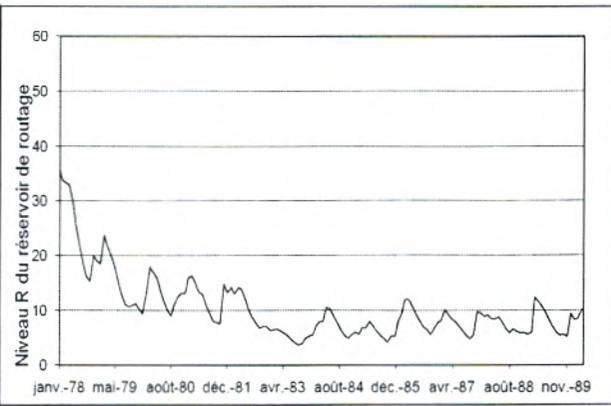


Figure 57: Courbe indique le niveau R du réservoir de routage

ETP Thornthwaite

2.Meffrouch

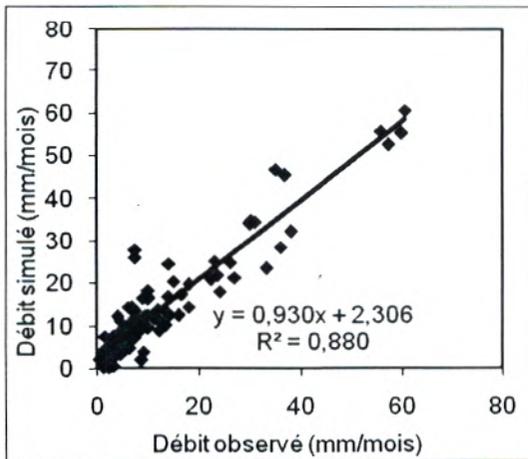


Figure 58: Corrélation entre les observés les débits simulés

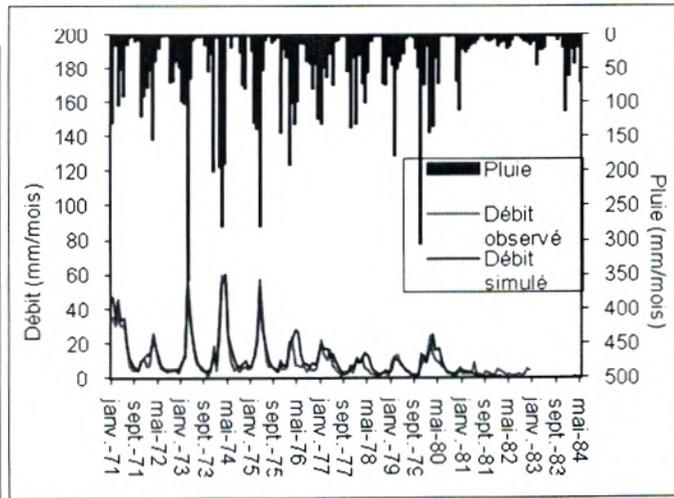


Figure 59: Visualisation de la qualité et débits du calage

ETP de Turc

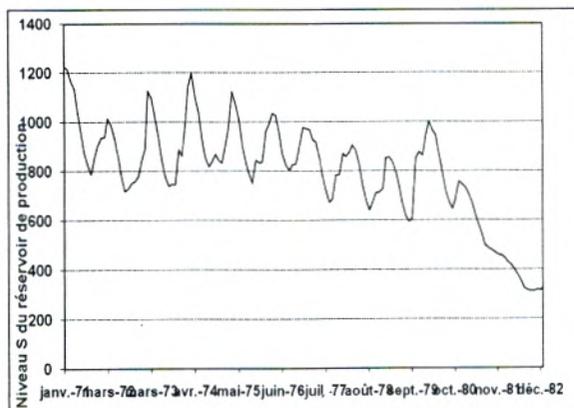


Figure 60 : Courbe indique le niveau S

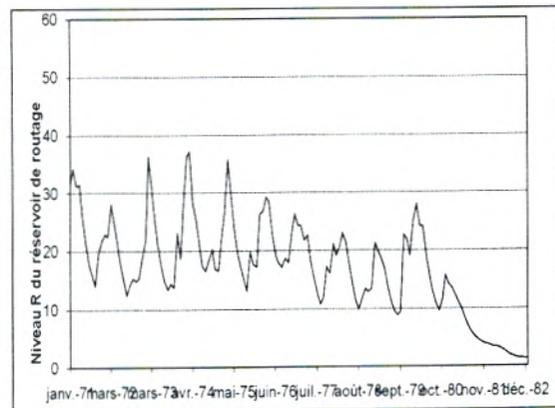


Figure 61 : Courbe indique le niveau R du

du réservoir de production

réservoir de routage

ETP de Turc

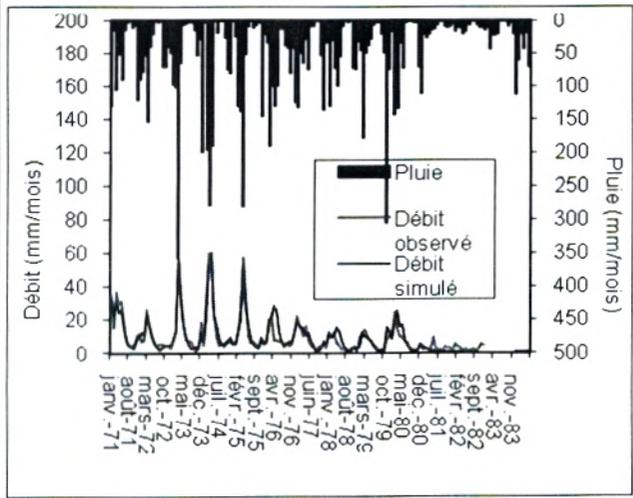
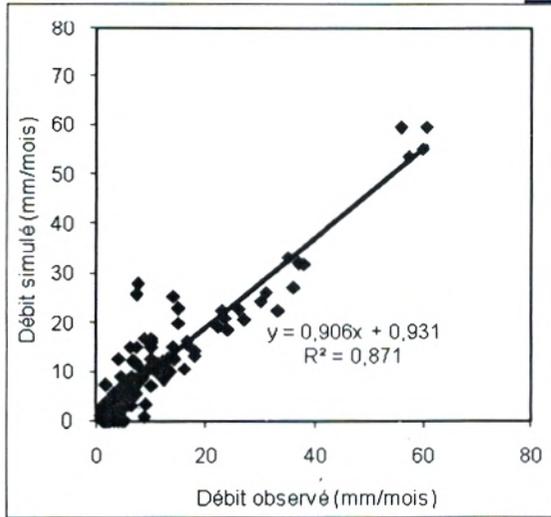


Figure 62: Corrélation entre les débits et les observés débits simulés

Figure 63: Visualisation de la qualité du calage

ETP de Thornthwaite

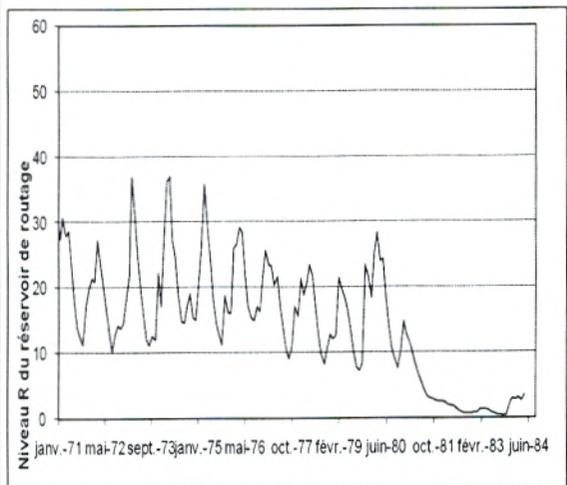
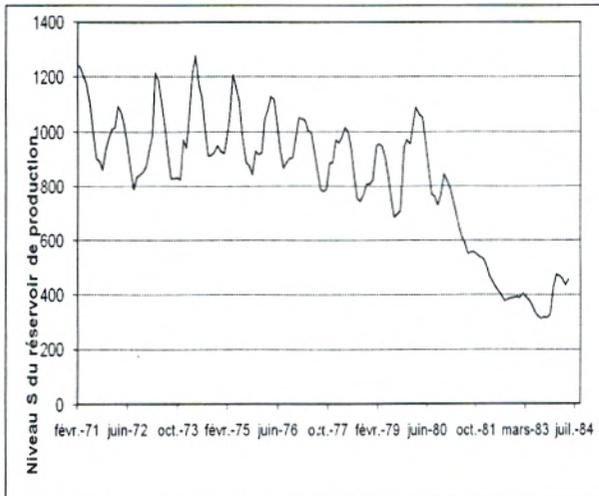


Figure 62: Courbe indique le niveau S du réservoir de production

Figure 63 : Courbe indique le niveau R du réservoir de routage

ETP de Thornthwaite

3.Sikkak

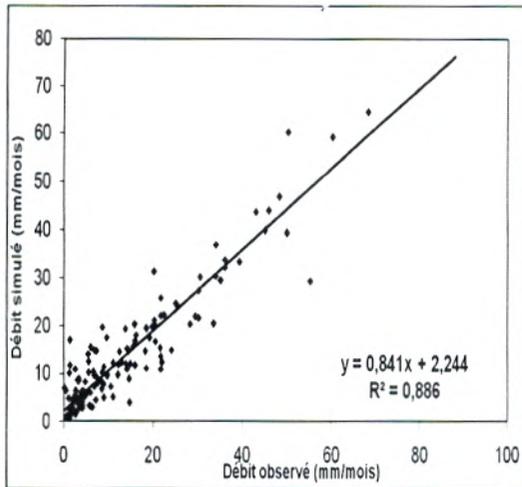


Figure 64: Corrélation entre les débits observés et les débits simulés

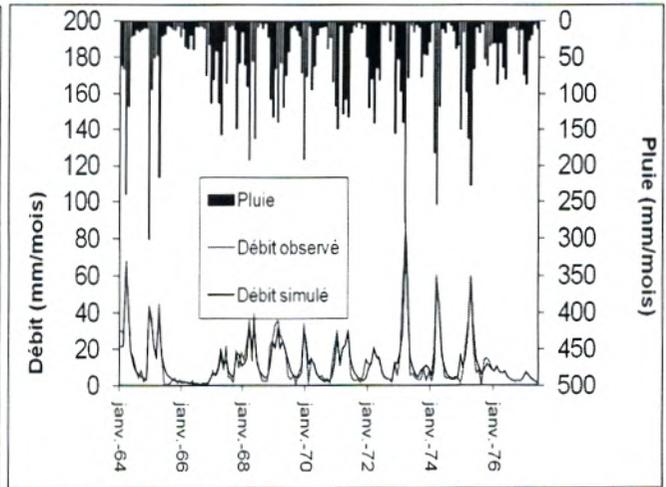


Figure 65: Visualisation de la qualité et les du calage

ETP deTurc

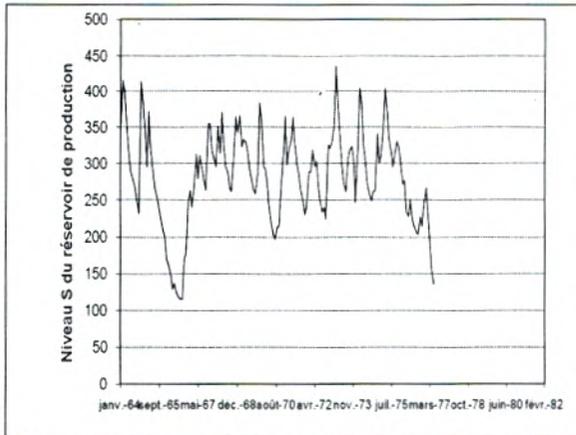


Figure 66: Courbe indique le niveau S du réservoir de production

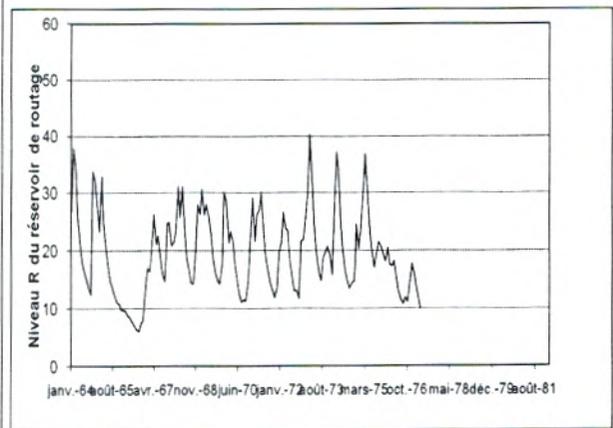


Figure 67: Courbe indique le niveau R du réservoir de routage

ETP deTurc

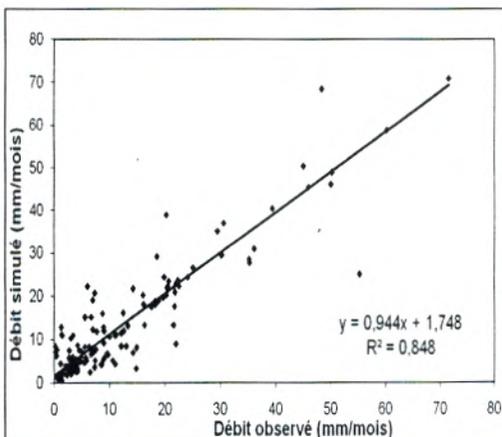


Figure 68: Corrélation entre les débits observés et les débits simulés

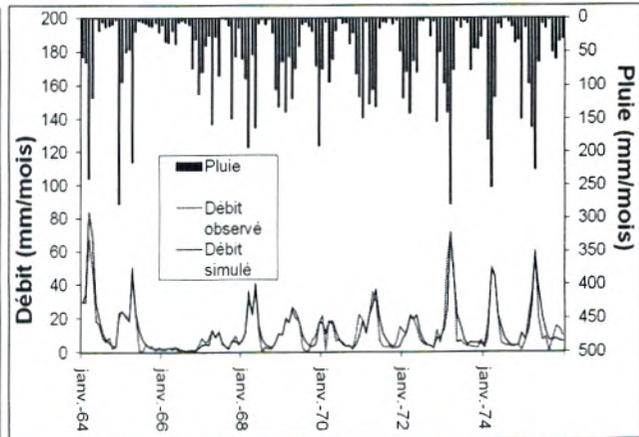


Figure 69: Visualisation de la qualité et les du calage

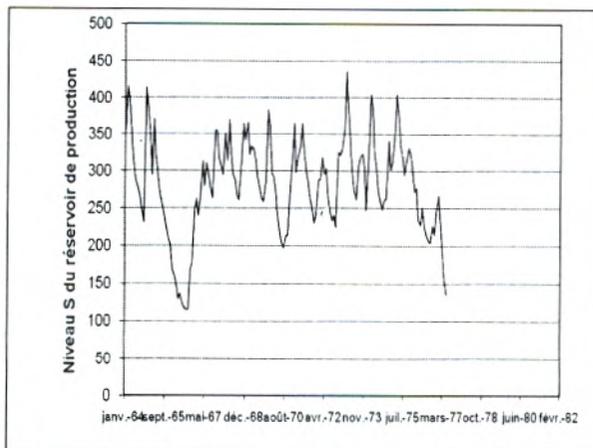
ETP de Thornthwaite

Figure 70: Courbe indique le niveau S réservoir de production

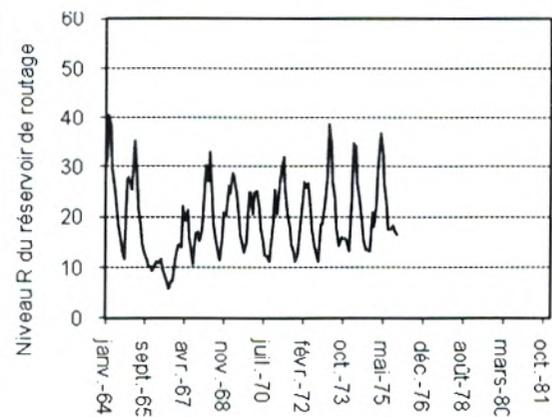


Figure 71: Courbe indique le niveau R du réservoir de routage

ETP de Thornthwaite

Tableau 13: Valeurs des paramètres après calibration et performances des modèles pour les trois sous bassins

Sous bassins	ETP Turc		ETP Thornthwaite	
	S	R	S	R
BeniBahhdel	(305.33-1153.89)	(4.41-34.03)	(336.50-1227.48)	(3.90-33.75)
Meffrouch	(312.11-1227.51)	(1.34-37.20)	(317.11-1276.37)	(0.49-36.98)
Sikkak	(114.84-434.79)	(6.04-40.33)	(345.88-967.90)	(5.89-40.48)

S : le niveau du réservoir de production

R : le niveau du réservoir de routage

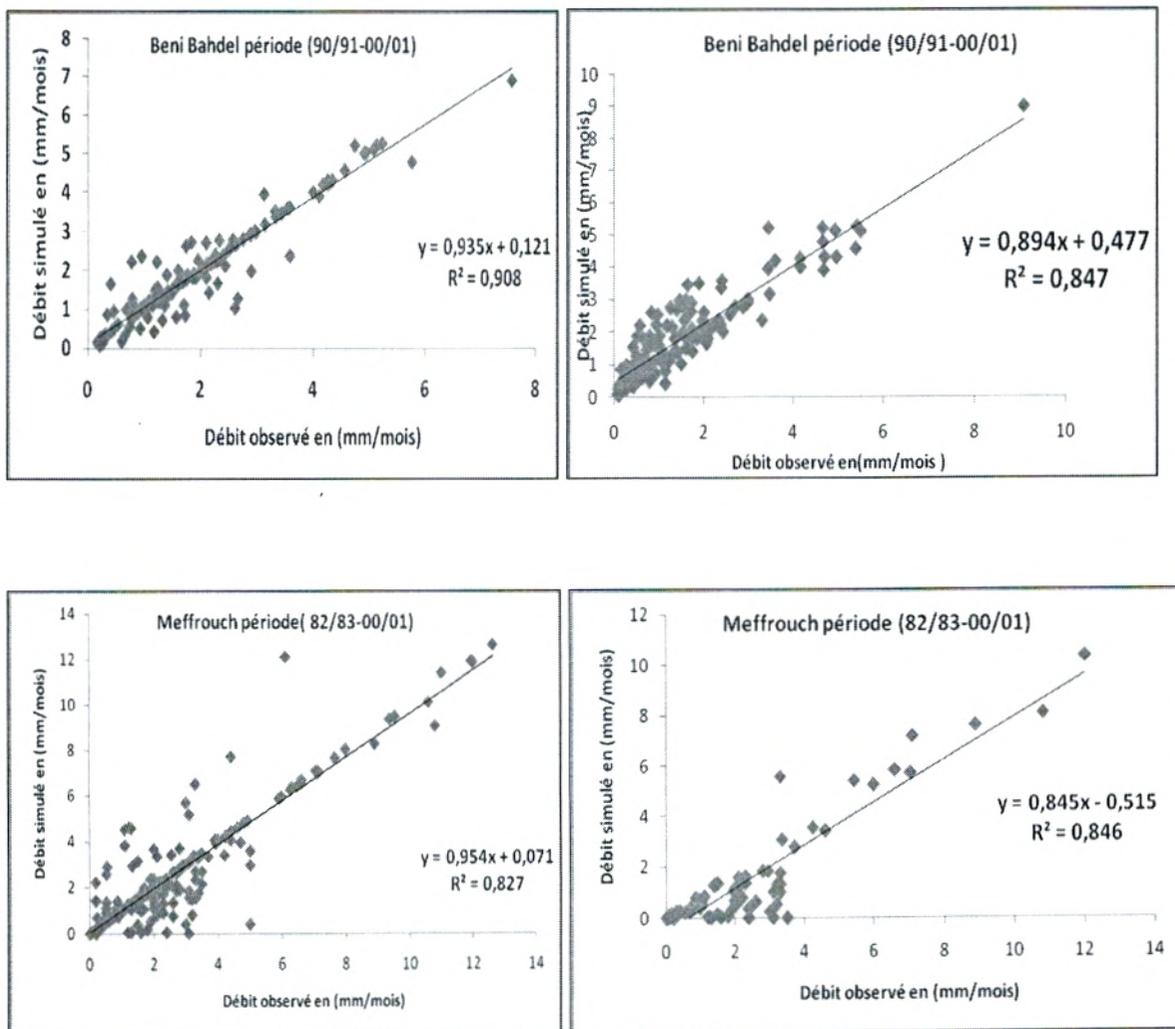
Les résultats du tableau 13 expliquent la variation du niveau du réservoir de production et de routage des différents sous bassins. Pour la valeur du niveau du réservoir de production du Meffrouche le maximum est de 1227.51 mm (l'ETP Turc) et 1276.37 (l'ETP Thornthwaite) (figure 63, 67) supérieure à celles de Beni Bahdel et Sikkak (figures 56,59 et 71,75). Pour la valeur du niveau du réservoir de routage du Meffrouch (figure 64 (Tturc) et la figure 68 (Thornthwaite). La réponse aux pluies est plus lente ce qui se traduit par des pertes en profondeur, l'amplitude de variation des niveaux dans les réservoirs de production et de routage est plus importante et la réponse plus aléatoire. Le karst plus développé dans le bassin du Meffrouche pourra l'expliquer.

IV.2.2.3 Validation des modèles mensuels :

Tableau 14 : les coefficients de corrélation entre les débits simulés et calculés au cours de la validation

	Coefficient de corrélation (R ²)	
	ETP Turc	ETP Thornthwaite
BeniBahdel	0.908	0.847
Meffrouch	0.827	0.846
Sikkak	0.95	0.83.2

Les résultats de la validation exprimés par des coefficients de corrélation (tableau 14) et les droites de la figure 72 nous laisse déduire que les modèles mensuels pour les trois bassins sont bien calés.



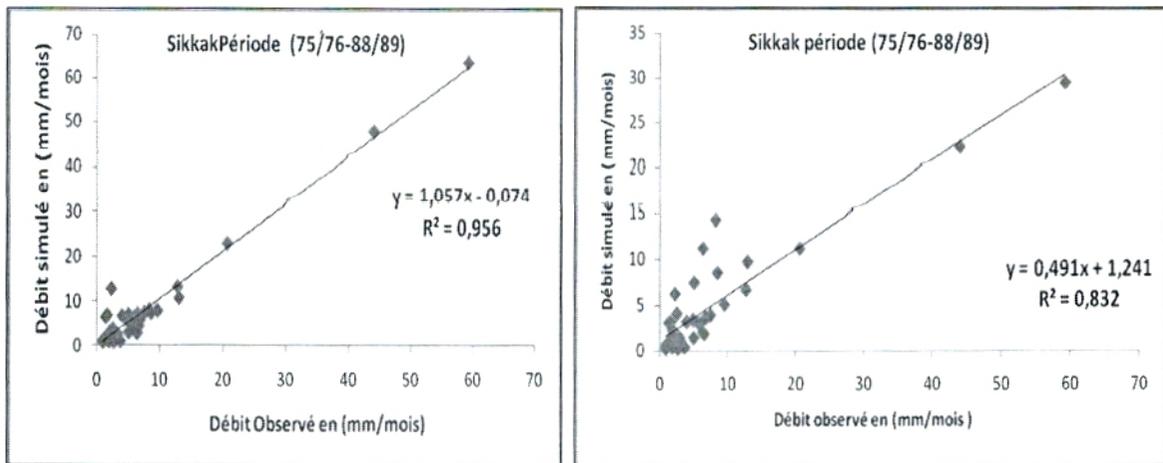


Figure 72: Validation de modèle GR2M pour les trois sous bassins selon l'utilisation de l'ETP de Turc et Thornthwaite.

Bibliographie

Andréassian V., 2002. *Impact de l'évolution du couvert forestier sur le comportement hydrologique des bassins versants. Thèse de Doctorat, Université Pierre et Marie Curie Paris VI, Cemagref (Antony), 276 p.*

Andréassian V., Hall A., Chahinian N. et Schaake J., 2006. *Introduction and Synthesis: Why should hydrologists work on a large number of basin data sets? In: V. Andréassian, A. Hall, N. Chahinian and J. Schaake (Editors), large sample basin experiments for hydrological model parameterization: Results of the Model Parameter Experiment - MOPEX. IAHS Publication n°307, p. 1-5*

Andréassian V., Parent E. et Michel C., 2003. *A distribution-free test to detect gradual changes in watershed behavior. Water Resources Research 39(9), 1252, doi:10.1029/2003WR002081.*

Baba Hamed K. et Kerzabi R., 1991. *Contribution à l'étude hydrogéologique de la Haute Tafna en amont du barrage Béni-Bahdel (Monts de Tlemcen). Mem. Ing. Sci. Terre. Univ. Oran. 424 p.*

Benadda L., 2000. *Contribution à l'étude du périmètre irrigué d'El Fhoul à partir du barrage du Sikkak. Mem. Ing. Hydraulique, Univ. Tlemcen.*

Benest M., 1985. *Evolution de la plate forme de l'Ouest algérien et du Nord - Est Marocain au cours du Jurassique supérieur et au début du Crétacé : Stratigraphie, milieux de dépôts et dynamique sédimentaire. Thèse, Doctorat, Univ. Lyon. Fasc. 1. 367 p.*

Bobee B., 1978. *Eléments de statistiques ; INRS-Eau Université du Québec, 159p.*

Bois Ph., Obled Ch., et Zin I., 2007. *Introduction Au Traitement De Données En Hydrologie ; 7^{ième} édition revue ; cours polycopie Institut National Polytechnique de Grenoble E.N.S., 265p.*

Bouanani A., Baba Hamed K., Bensalah M., 2004. *Diagnosis of the pollution and Sédiment transport in the Sikkak River (Tafna –NW Algeria). Conf. Int. USTRON. Pologne 15- 18 juin.*

Bouanani A., 2004. *Hydrologie, Transport Solide Et Modélisation : Etude de quelques Sous Bassins de la Tafna (Nw – Algerie) ; These doctorat d'Etat, Université Abou Bekr Belkaid Tlemcen 250 p,*

Boukhari K., Er-Rouane S., Gouzrou A., 2004. *Analyse statistique du régime hydrologique Sur la plaine de Mejjate et sa bordure occidentale, (Maroc). Larhyss Journal, ISSN 1112-3680, n° 03, 14 p.*

Dakiche A., 1993. *Etude statistique multidimensionnelle du régime pluviométrique et des crues, application au bassin versant de la Tafna. Rapp. Inédit. ANRH, juin 1993.*

Beni Bahdel : les données et les résultats de GR2M

Mois	Pluie (mm)	Débit (mm)	ETP Turc		ETP Thorntwaite	
			ETP	Débit simulé	ETP	Débit simulé
janv-78	114	59,48	35,36	60,47	21,01	58,07
févr-78	17,8	40,23	48,53	44,57	36,73	43,37
mars-78	48,6	38,95	56,05	42,62	40,16	42,20
avr-78	57,7	35,89	75,07	39,25	51,87	39,92
mai-78	29,6	19,89	99,5	28,48	75,23	29,99
juin-78	2,4	15,68	113,62	17,92	101,76	19,23
juil-78	6,48	13,56	135,19	12,43	162,47	12,76
août-78	3,25	10	125,17	8,64	148,63	8,38
sept-78	4,27	6,17	93,71	6,42	98,79	6,01
oct-78	21,9	4,75	70,75	5,84	71,92	5,36
nov-78	112	10,59	44,47	10,72	36,7	10,00
déc-78	33,8	10,05	39,72	9,55	34,48	8,84
janv-79	31,1	9,52	43,85	8,88	35,03	8,28
févr-79	123,6	16,87	46,11	16,20	30,72	15,55
mars-79	29,5	16,2	55,77	12,78	37,74	12,46
avr-79	19,2	9,5	75,07	10,12	49,76	10,21
mai-79	9	7,56	105,59	7,49	88,97	7,74
juin-79	3,62	6,02	120,83	5,37	125,61	5,50
juil-79	2,9	3,98	134,2	3,85	156,41	3,78
août-79	0,7	2,96	125,91	2,75	151,28	2,55
sept-79	30,26	2,9	95,19	2,61	103,10	2,34
oct-79	42,1	2,3	67,64	2,76	60,17	2,45
nov-79	40,8	3,24	43,05	2,94	31,95	2,63
déc-79	7,2	3,7	41,34	2,42	36,95	2,13
janv-80	3,5	1,65	34,83	2,00	20	1,76
févr-80	98,4	3,58	44,65	3,92	28,97	3,76
mars-80	123	10	56,59	7,76	40,86	7,71
avr-80	32,7	6,51	74,77	6,70	50,86	6,70
mai-80	29,2	7,52	101,91	5,75	80,76	5,86
juin-80	8,57	4,36	121,71	4,17	130,67	4,16
juil-80	8,58	1,6	133,4	3,08	153,51	2,96
août-80	5,23	2,56	127,87	2,26	162,42	2,03
sept-80	17,2	1,8	94,09	1,88	99,94	1,62
oct-80	88,1	2,5	70,38	2,85	70,3	2,48
nov-80	75,8	5,03	43,46	3,86	34,12	3,37
déc-80	50,8	7,6	34,13	4,33	22,92	3,81
janv-81	32	2,4	29,87	4,30	15	3,83
févr-81	78,2	6,3	41,04	6,31	24,55	5,89
mars-81	42,8	8,56	61,35	6,43	53,29	6,07
avr-81	19,5	6,02	76,27	5,37	55,78	5,15
mai-81	8,1	1,8	102,5	4,10	84,34	3,98
juin-81	29,2	4,01	120,39	3,76	126,83	3,66
juil-81	6,54	2,89	130,87	2,76	143,36	2,59

août-81	3,7	2,09	123,65	2,02	142,19	1,80
sept-81	2,4	1,81	98,29	1,51	119,28	1,26
oct-81	26,1	1,52	70	1,41	70,68	1,15
nov-81	25,4	1,3	45,64	1,36	40,65	1,09
déc-81	200	6,52	30,71	5,49	18,84	4,92
janv-82	14,6	4,36	39,34	4,43	23,97	3,92
févr-82	48,8	5,62	44,65	5,06	25,78	4,62
mars-82	8,4	4,21	59,42	4,05	42,66	3,74
avr-82	47,9	5,2	78,55	4,62	54,22	4,49
mai-82	34,2	5,69	105,86	4,38	86,5	4,37
juin-82	11,1	3,34	124,22	3,33	138,08	3,24
juil-82	2	1,87	136,35	2,36	165,89	2,17
août-82	5,5	0,875	125,17	1,76	145,66	1,52
sept-82	13,8	1,56	96,78	1,44	107,79	1,19
oct-82	2	1,3	73,74	1,10	78,61	0,86
nov-82	40,36	1,2	48,18	1,20	42,29	0,94
déc-82	27,3	3,7	40,09	1,20	31,64	0,94
janv-83	0,5	1,6	32,88	0,98	17,55	0,75
févr-83	20,7	1,08	41,85	0,98	24,61	0,78
mars-83	21,5	1,02	61,82	0,99	52,87	0,81
avr-83	11,8	0,95	80,46	0,90	63,59	0,74
mai-83	7,8	1,1	104,49	0,77	87,9	0,63
juin-83	10,26	0,7	123,61	0,66	139	0,53
juil-83	4,5	0,5	133,19	0,53	152,66	0,41
août-83	6,35	0,5	122,66	0,43	136,8	0,31
sept-83	6,2	1,25	96,6	0,35	110,60	0,24
oct-83	43,4	0,36	68,45	0,39	64,3	0,27
nov-83	70,8	0,59	44,47	0,58	36,54	0,44
déc-83	36,1	0,65	31,98	0,67	19,65	0,51
janv-84	25,3	0,76	34,83	0,71	18,94	0,55
févr-84	68,1	1,4	40,49	1,16	21,43	0,98
mars-84	40,3	1,56	54,38	1,40	35,13	1,22
avr-84	23,9	1,42	83,03	1,40	68,26	1,24
mai-84	87,4	2,7	96,96	2,35	66,97	2,26
juin-84	34	0,452	117,86	2,27	114,01	2,18
juil-84	7	1,8	138,2	1,71	177,78	1,54
août-84	8,36	1,43	124,3	1,32	141,91	1,11
sept-84	2	3,54	99,26	0,99	121,93	0,77
oct-84	0,1	0,7	74,4	0,75	83,81	0,55
nov-84	10,7	1,9	50,64	0,63	52,27	0,44
déc-84	52,6	1,5	36,55	0,79	26,11	0,57
janv-85	38,3	1	34,56	0,91	18,12	0,67
févr-85	8,8	1,25	50	0,81	37,72	0,59
mars-85	52,8	2,56	53,51	1,10	32,97	0,87
avr-85	22,7	2,1	81,51	1,09	63,46	0,88
mai-85	56,8	1,65	101,62	1,43	77,16	1,24
juin-85	9,36	1,2	121,92	1,17	129,48	0,99
juil-85	4,69	0,98	136,72	0,91	169,15	0,73

juin-93	4	2,9	75,68	2,88	162,03	2,98
juil-93	10,54	1,65	46,39	2,31	184,16	2,06
août-93	3,5	1,8	15,99	1,87	149,24	1,37
sept-93	3,3	1,6	41,25	1,56	113,89	0,94
oct-93	10,2	1,45	45,13	1,42	84,68	0,72
nov-93	39,4	1,74	66,43	1,70	35,52	0,75
déc-93	30,3	1,87	83,28	1,77	3,07	0,79
janv-94	91,6	2,98	110,7	2,96	15,7	1,59
févr-94	67,6	3,58	128,09	3,55	28,25	2,40
mars-94	9,1	2,6	139,87	2,55	44,41	2,00
avr-94	23,5	2,13	131,41	2,11	57,65	1,96
mai-94	22,8	1,8	98,29	1,78	97,6	1,84
juin-94	0,8	1,3	76,67	1,31	154,88	1,30
juil-94	17,5	1,09	44,07	1,15	184,98	1,05
août-94	1,5	0,98	34,92	0,92	181,09	0,71
sept-94	21,3	0,92	35,36	0,91	111,67	0,59
oct-94	5,1	0,738	47,66	0,78	87,93	0,43
nov-94	56	1,2	61,82	1,09	29	0,53
déc-94	25	1,15	81,76	1,10	18,85	0,53
janv-95	14	0,98	114,82	0,97	20	0,49
févr-95	44,3	1,12	125,91	1,10	14,67	0,66
mars-95	235,2	5,12	138,47	5,10	40,78	4,93
avr-95	41,5	4,3	130,7	4,35	64,22	4,68
mai-95	11,9	3,94	98,78	3,13	115,5	3,43
juin-95	5	2,21	71,48	2,29	144,2	2,38
juil-95	3,69	1,78	46,11	1,77	176,75	1,61
août-95	3,2	1,36	34,92	1,43	176,86	1,09
sept-95	34,4	1,6	37,91	1,59	115,47	0,99
oct-95	28	1,69	37,45	1,68	67,51	0,89
nov-95	39,6	2,23	59,67	1,96	34,74	0,94
déc-95	14,4	2,6	83,64	1,75	19,72	0,82
janv-96	107	3,5	108,73	3,33	29,93	1,89
févr-96	93,9	5,2	126,3	4,75	14,96	3,44
mars-96	70,7	5,2	137,83	5,15	53,12	4,65
avr-96	61,6	5,1	126,54	5,09	55,25	5,49
mai-96	34,9	4,3	95,01	4,27	91,69	4,95
juin-96	9,6	3,16	76,45	3,14	145,64	3,47
juil-96	21,6	2,78	49,02	2,76	172,39	2,69
août-96	14,9	2,36	40,09	2,40	150,66	1,97
sept-96	19,8	2,37	43,65	2,27	96,90	1,56
oct-96	19,5	2,15	38,05	2,18	87,58	1,29
nov-96	8	1,89	64,79	1,88	42,09	1,01
déc-96	49,1	2,75	80,46	2,34	29,24	1,25
janv-97	108	4,20	112,58	4,27	24,77	2,70
févr-97	1	1,96	124,43	2,90	27,4	2,05
mars-97	6,2	2,08	165,83	2,09	33,95	1,73
avr-97	74,9	2,76	127,52	2,58	59,68	2,88

mars-01	7	0,71	141,81	1,32	66,35	0,91
avr-01	8,1	1,01	131,95	1,03	69,11	0,78
mai-01	5,6	1,25	101,11	0,79	100,2	0,64
juin-01	0,9	0,17	72,81	0,61	159,64	0,47
juil-01	0,4	0,5	48,94	0,47	194,33	0,34
août-01	10,4	1,64	42,11	0,41	180,85	0,26
sept-01	38,6	0,94	44,92	0,46	121,48	0,26
oct-01	97,2	1,02	49,79	0,94	64,47	0,47
nov-01	51,3	1,23	70,89	1,22	35,89	0,59
déc-01	23,6	1,47	88,14	1,19	28,81	0,59

Meffrouche les données et les résultats de GR2M

Mois	Pluie (mm)	Débit (mm)	ETP Turc		ETP Thorntwaite	
			ETP	Débit simulé	ETP	Débit simulé
janv-71	129,1	35	39,60	48,62	26,73	37,70
févr-71	15,3	30,2	48,92	36,53	36,33	27,38
mars-71	104,5	36,87	59,67	47,16	46,37	36,23
avr-71	50,6	30	72,26	35,43	44,96	27,84
mai-71	90	31	97,28	35,88	68,31	29,30
juin-71	15	18	108,76	20,76	85,90	16,94
juil-71	4	7,4	130,08	12,76	137,81	9,80
août-71	0,9	4,3	124,22	8,25	135,77	5,82
sept-71	10,2	4,4	93,14	6,28	9,53	4,86
oct-71	7	4,1	62,89	4,88	48,21	3,94
nov-71	120	10	42,73	10,27	31,67	9,28
déc-71	90,5	11	34,59	13,15	22,92	11,83
janv-72	78,4	6,8	33,92	14,88	19,29	13,35
févr-72	52,1	7,5	42,22	13,98	25,61	12,51
mars-72	152,8	26	51,19	25,36	31,97	23,40
avr-72	39	16,58	67,6	17,76	39,18	16,26
mai-72	20,5	9,4	93,3	12,50	62,28	11,64
juin-72	0,4	5,6	111,06	7,88	94,52	7,23
juil-72	2,3	4,2	129,32	5,27	136,23	4,56
août-72	0,3	4,7	121,86	3,53	126,70	2,82
sept-72	69,9	5,2	94,97	4,75	10,41	4,41
oct-72	69,4	4,2	72,69	5,65	79,19	5,46
nov-72	39,7	4,5	39,34	5,27	26,73	5,01
déc-72	49	2,6	32,62	5,72	21,02	5,50
janv-73	98,1	7,2	33,81	9,15	17,99	9,06
févr-73	101,3	14,32	36,06	12,90	16,43	12,79
mars-73	357,3	55,8	47,96	54,76	25,69	53,81
avr-73	64,1	37,89	74,16	31,93	48,58	30,24
mai-73	6,8	16,54	102	17,60	79,77	16,55
juin-73	4,5	8,5	114,73	11,41	103,79	10,50
juil-73	3,2	7,3	132,57	7,55	148,97	6,40
août-73	3	6,5	127,04	5,12	149,40	3,87
sept-73	15	4,6	88,99	4,12	8,08	3,35

oct-73	53,3	1,6	67,99	4,85	61,76	4,28
nov-73	28	3,2	46,19	4,40	39,70	3,84
déc-73	199	18	32,74	14,70	20,01	14,00
janv-74	3,3	4,6	39,83	8,68	28,09	7,64
févr-74	194,6	33,2	38,29	23,48	19,72	22,03
mars-74	278	59,8	53,25	54,14	34,76	50,19
avr-74	189,1	60,52	64,38	59,27	33,88	54,49
mai-74	1,7	23	103,36	25,19	84,73	22,69
juin-74	18,7	10	83,1	18,50	39,65	17,57
juil-74	0,3	4,6	133,27	11,47	153,01	10,05
août-74	0,2	6,1	124,98	7,54	139,95	6,00
sept-74	26,8	3,5	97,74	6,70	11,57	5,91
oct-74	74,6	5,8	67,29	8,76	60,82	8,28
nov-74	79,3	6,5	47,76	10,75	44,88	10,09
déc-74	0,4	5	28,68	7,08	15,20	6,35
janv-75	24,8	5,4	39,8	6,68	27,55	6,09
févr-75	129,7	13,1	42,95	13,92	25,78	13,36
mars-75	138,1	27	51,59	21,49	31,43	20,50
avr-75	279	57,2	69,94	51,75	41,57	49,37
mai-75	51,7	36	96,82	28,46	68,01	26,67
juin-75	8,1	10	82,01	16,71	37,62	16,38
juil-75	0,3	6,2	138,23	10,20	178,34	8,95
août-75	11,2	6,3	126,88	7,35	148,80	5,79
sept-75	6,9	5,4	94,14	5,30	9,97	4,46
oct-75	3,9	3,8	63,36	3,98	49,89	3,46
nov-75	144,9	6,4	46,32	10,27	40,44	9,96
déc-75	21,1	5,3	36,36	7,69	26,55	7,01
janv-76	33,4	6,1	33,64	7,33	16,40	6,75
févr-76	190,1	15	39,43	20,61	18,95	20,07
mars-76	99,6	23,51	53,63	21,71	32,32	20,65
avr-76	130,4	7,5	68,91	27,64	37,17	26,70
mai-76	98,7	7,3	102,61	26,04	78,60	25,03
juin-76	13,5	6,6	118,45	14,33	114,43	13,04
juil-76	13,2	7	134,04	9,35	154,41	7,81
août-76	38,2	3,3	126,85	8,04	147,26	6,22
sept-76	41,8	5,6	92,8	7,18	9,19	5,97
oct-76	80,5	4,6	71,61	8,92	71,42	7,87
nov-76	41,8	5,2	43,59	8,00	31,75	6,98
déc-76	123,5	12	34,54	13,97	21,36	12,76
janv-77	132	22,31	37,37	20,89	22,01	19,14
févr-77	48,9	14	47,38	16,75	32,03	15,00
mars-77	63,7	10	62,77	16,73	52,59	14,92
avr-77	28,8	16	83,3	12,65	68,03	11,05
mai-77	73,8	7	100,11	14,04	73,19	12,61
juin-77	9,1	4,4	113,98	8,59	99,66	7,41
juil-77	8,1	3	125,59	5,73	118,62	4,74
août-77	1,5	1,3	119,08	3,76	113,21	2,94
sept-77	0,9	3,2	93,9	2,60	9,70	2,21

oct-77	53,2	3,6	66,13	3,20	55,02	3,12
nov-77	136,2	4,7	40,23	7,30	25,84	7,74
déc-77	33,9	3	40,16	6,19	33,22	6,15
janv-78	130,4	11,1	34,17	11,88	15,25	12,17
févr-78	30,6	8,52	49,89	9,21	34,18	9,03
mars-78	72,6	12,35	57,83	10,97	37,25	10,96
avr-78	99,7	6,1	72,23	14,41	39,53	14,72
mai-78	55,3	4,1	97,76	12,27	62,92	12,59
juin-78	9,5	1,7	111,91	7,60	88,45	7,66
juil-78	0,3	1,7	137,43	4,66	170,69	4,21
août-78	2,4	1,2	126,74	3,08	144,68	2,49
sept-78	0,5	1,1	94,37	2,10	9,52	1,78
oct-78	72,2	2,7	70,97	3,08	66,08	3,01
nov-78	73,4	2,54	47,1	4,17	37,56	4,17
déc-78	31,2	1,2	43,1	3,79	37,87	3,63
janv-79	45,2	9,1	44,09	4,12	30,48	3,97
févr-79	177,9	12,05	44,43	11,88	22,88	12,13
mars-79	50,1	13,45	54,18	10,09	29,21	9,90
avr-79	38,5	8	75,07	8,55	43,13	8,51
mai-79	28,4	6,7	105,61	6,79	81,21	6,79
juin-79	6	4,2	119,67	4,46	113,95	4,25
juil-79	2,3	3,4	133,82	2,91	149,21	2,53
août-79	3,4	0,66	127,2	1,97	146,07	1,53
sept-79	20,8	1,8	97,71	1,66	10,90	1,39
oct-79	48,4	1,4	68,59	1,90	56,71	1,78
nov-79	305	7,3	45,47	13,92	32,27	14,97
déc-79	74	10	42,02	12,64	33,63	12,31
janv-80	17,4	12,21	38,13	8,87	20,83	8,32
févr-80	144,1	24	48,77	17,67	32,08	17,31
mars-80	134,4	14	56,99	24,16	35,94	23,36
avr-80	33,5	10	75,34	16,12	45,63	15,43
mai-80	71,4	8,8	97,83	16,37	63,53	16,22
juin-80	2,5	6,8	119,51	9,27	115,55	8,69
juil-80	1	6,1	134,34	5,78	153,73	4,94
août-80	1,9	2,8	129,97	3,81	163,50	2,85
sept-80	2,2	2,1	93,9	2,67	9,36	2,08
oct-80	2,5	1,6	69,47	1,98	61,40	1,57
nov-80	69,4	1,3	44,83	3,05	32,32	2,78
déc-80	111	4,1	38,59	5,92	26,99	5,72
janv-81	20,3	1,8	53,08	4,63	55,98	4,10
févr-81	25,5	2,7	63,63	4,08	79,73	3,37
mars-81	20	1,7	78,08	3,44	107,76	2,56
avr-81	15	3	98,73	2,74	121,35	1,80
mai-81	13	8,7	117,86	2,11	124,89	1,24
juin-81	7	1,8	115,86	1,52	96,06	0,82
juil-81	1,7	1,8	109,37	1,04	62,14	0,54
août-81	0,2	1,4	115,95	0,71	93,19	0,35
sept-81	8	3,3	53,77	0,55	1,35	0,30

oct-81	10,2	2,6	51,34	0,46	20,28	0,28
nov-81	8	2,4	48,3	0,38	37,28	0,25
déc-81	5,4	1,3	42,11	0,32	31,74	0,22
janv-82	16	4,7	51,37	0,31	51,16	0,23
févr-82	11	3,3	65,11	0,28	90,40	0,20
mars-82	10,2	2,5	82,35	0,24	141,33	0,15
avr-82	20,1	1,6	97,07	0,24	114,33	0,14
mai-82	16	2	115,73	0,21	117,47	0,11
juin-82	7,2	1,5	103,61	0,16	64,07	0,07
juil-82	0,5	1,5	103,51	0,11	53,37	0,05
août-82	0,4	2,3	108,63	0,08	73,44	0,03
sept-82	6,4	1,5	67,52	0,06	2,82	0,03
oct-82	10	2	52,64	0,05	23,42	0,03
nov-82	10,5	5,2	43,71	0,04	28,03	0,03
déc-82	15	4,1	41,77	0,04	32,55	0,03
les données de Validation						
janv-83	10	0,029	50,88	0,04	47,38	0,03
févr-83	43,7	0,054	65,44	0,06	90,73	0,06
mars-83	22,6	1,6	79,66	0,07	118,43	0,06
avr-83	22,2	1,2	97,42	0,07	113,90	0,06
mai-83	19,6	2,4	120,26	0,07	137,35	0,05
juin-83	0,9	0,045	116,41	0,05	97,96	0,03
juil-83	0,7	0,029	112,24	0,04	68,51	0,02
août-83	0,5	0,22	97,6	0,02	47,21	0,01
sept-83	8	0,015	70,95	0,02	3,10	0,01
oct-83	2,6	3,1	50,82	0,01	19,64	0,01
nov-83	19,5	3,5	46,92	0,02	33,61	0,01
déc-83	112,9	0,08	43,72	0,09	36,20	0,10
janv-84	61,6	0,163	44,69	0,17	32,04	0,20
févr-84	20	0,164	61,26	0,18	70,10	0,17
mars-84	42,5	0,24	83,1	0,24	148,35	0,21
avr-84	18,2	0,24	99,09	0,22	126,34	0,15
mai-84	70	0,36	119,01	0,39	134,01	0,25
juin-84	3,2	0,25	105,54	0,28	69,55	0,14
juil-84	0,5	1,8	106,27	0,19	59,43	0,08
août-84	1,3	1,28	113,28	0,13	87,70	0,05
sept-84	10	0,098	58,73	0,11	1,93	0,04
oct-84	6	1,3	47,15	0,08	17,56	0,04
nov-84	110	0,3	40,09	0,29	21,98	0,25
déc-84	50,7	2,4	45,01	0,41	42,75	0,37
janv-85	82,5	0,85	48,74	0,84	41,05	0,77
févr-85	19,5	2,6	62,89	0,76	76,41	0,61
mars-85	94,1	3,3	82,07	1,52	137,98	1,19
avr-85	37,5	3,3	102,82	1,49	148,93	0,94
mai-85	86,2	2,3	120,09	2,22	137,37	1,30
juin-85	4,3	2	115,41	1,43	95,52	0,69
juil-85	5,2	0,98	107,56	0,97	59,38	0,43

août-85	2,6	0,67	84,16	0,67	29,40	0,29
sept-85	16,4	0,56	60,02	0,56	1,90	0,28
oct-85	0,8	1,5	63,5	0,41	41,35	0,21
nov-85	102,6	2,2	39,74	1,01	20,05	0,82
déc-85	62,7	1,4	44,71	1,44	39,96	1,23
janv-86	115,8	3,35	19,63	3,26	71,84	2,77
févr-86	168,3	10,8	62,02	8,65	74,95	6,86
mars-86	141,5	7,1	53,8	13,85	29,98	10,73
avr-86	54,2	12	68,91	11,38	34,30	8,83
mai-86	6,1	7,05	108,47	6,90	92,24	5,18
juin-86	4,6	4,6	117,38	4,55	106,97	3,30
juil-86	0,9	2,95	135,39	2,95	159,09	1,93
août-86	3,2	1,98	127,34	2,01	148,03	1,17
sept-86	37,4	2,01	61,32	2,08	2,28	1,31
oct-86	40,5	2,2	53,04	2,24	25,59	1,56
nov-86	153,5	6,26	41,43	6,24	25,23	5,33
déc-86	58,8	3,3	41,16	6,47	32,70	5,39
janv-87	50,8	6,6	38,15	6,65	20,48	5,57
févr-87	70,1	8,9	43,91	8,17	22,98	7,11
mars-87	12	5,98	59,18	5,93	39,87	5,07
avr-87	4,4	4,23	84,49	4,25	66,81	3,59
mai-87	14,3	3,7	104,21	3,41	78,83	2,92
juin-87	4,5	3,3	119,03	2,41	112,94	1,98
juil-87	0,6	3,1	130,44	1,62	134,07	1,22
août-87	0,4	1,024	126,27	1,09	142,04	0,74
sept-87	3,5	0,7	95,91	0,78	10,17	0,54
oct-87	41,3	3,2	71,12	0,89	66,39	0,72
nov-87	55,2	1,099	45,06	1,17	32,39	1,07
déc-87	16,4	0,96	35,04	1,03	20,01	0,92
janv-88	65,3	3,2	41,15	1,59	23,95	1,58
févr-88	52,8	2,8	43,66	2,03	21,14	2,06
mars-88	9	1,5	60,16	1,59	39,92	1,55
avr-88	41,4	2,3	79,65	1,79	51,83	1,84
mai-88	32,4	2,1	101,62	1,73	69,12	1,80
juin-88	13,4	2	114,65	1,32	94,20	1,33
juil-88	0,6	2,1	134,2	0,87	150,36	0,78
août-88	0,8	1,9	128,55	0,58	153,20	0,45
sept-88	12	3,0	98,94	0,45	11,45	0,36
oct-88	13	0,31	72,55	0,36	69,40	0,30
nov-88	42,9	0,4	46,76	0,43	34,70	0,42
déc-88	15,9	0,35	40,99	0,39	30,31	0,38
janv-89	23,1	0,4	37,91	0,39	17,56	0,41
févr-89	31,3	5	43,91	0,45	20,26	0,51
mars-89	221,6	4,2	61,12	3,46	40,22	4,46
avr-89	46,8	3,4	75,37	3,33	40,85	3,84
mai-89	43	3,12	104,49	3,12	74,35	3,48

juin-89	12,3	2,15	122,14	2,18	121,26	2,22
juil-89	3,5	1,38	137,65	1,42	168,46	1,25
août-89	2	0,9	129,39	0,93	156,89	0,70
sept-89	10,4	0,66	97,79	0,69	10,66	0,53
oct-89	9,8	0,5	75,25	0,53	79,86	0,40
nov-89	38,2	0,55	49,84	0,59	41,71	0,51
déc-89	14,6	0,5	34,81	0,51	17,15	0,45
janv-90	110	1,32	35,36	1,37	14,21	1,50
févr-90	7	1,014	50,2	1,06	31,27	1,07
mars-90	11,7	0,86	62,05	0,90	42,23	0,89
avr-90	71,7	1,44	75,97	1,48	41,79	1,65
mai-90	71,9	2,04	104,49	2,08	74,10	2,38
juin-90	116	2,8	120,61	3,72	114,23	4,24
juil-90	12,5	2,37	134	2,40	147,00	2,28
août-90	4	1,46	125,91	1,52	136,36	1,24
sept-90	20	1,14	97,96	1,19	10,72	1,01
oct-90	19	0,94	74,24	0,97	73,99	0,85
nov-90	46,8	2	50,48	1,13	43,56	1,08
déc-90	88	1,93	44,74	1,98	39,10	2,08
janv-91	68,4	2,6	37,17	2,70	17,93	2,83
févr-91	71,2	2	39,8	3,69	16,36	3,90
mars-91	190,3	11	56,05	11,08	32,05	12,06
avr-91	5,2	6,58	73,22	6,43	39,28	6,53
mai-91	40,5	5,9	100,72	5,82	67,40	6,14
juin-91	0,6	5	120,17	3,61	115,47	3,58
juil-91	3,58	2,35	136,54	2,39	163,82	2,14
août-91	3	1,56	130,54	1,61	165,83	1,24
sept-91	4,7	1,3	102,14	1,13	13,35	0,88
oct-91	97,5	2	71,48	2,13	65,87	2,07
nov-91	16,2	1,65	46,57	1,70	34,57	1,56
déc-91	45,7	2,8	34,36	1,98	17,86	1,92
janv-92	28,8	1,88	35,89	1,97	18,09	1,93
févr-92	18	1,75	45,61	1,78	26,69	1,76
mars-92	113	4,7	54,38	4,02	31,85	4,42
avr-92	101,6	2	79,38	6,22	55,06	6,74
mai-92	120	9,36	106,12	9,25	86,11	9,78
juin-92	4,3	3,1	110,36	5,18	85,30	5,02
juil-92	3,5	1,5	133,19	3,21	148,51	2,84
août-92	1	1,7	128,21	2,05	153,54	1,60
sept-92	1	2,3	96,78	1,38	10,69	1,11
oct-92	15	1,68	66,39	1,14	53,01	0,99
nov-92	52	1,4	45,83	1,47	35,29	1,46
déc-92	48,5	1,78	37,78	1,80	25,88	1,87
janv-93	30,56	1,76	38,39	1,83	20,59	1,91

févr-93	45	2,099	41,18	2,19	18,87	2,37
mars-93	54,8	2,69	59,92	2,76	41,11	3,05
avr-93	84	3,9	78,28	4,14	50,67	4,67
mai-93	140	7,99	101,32	8,01	70,62	9,10
juin-93	3,3	4,4	117,62	4,48	107,02	4,52
juil-93	1	2,7	133,6	2,72	148,96	2,45
août-93	0,2	1,66	127,17	1,72	146,57	1,37
sept-93	11,2	1,23	99,1	1,29	11,70	1,08
oct-93	8,9	2,3	67,43	0,98	54,22	0,87
nov-93	179	1,1	48,14	3,96	39,88	4,53
déc-93	68,2	1,3	38,57	4,66	26,23	4,97
janv-94	159,8	1,32	38,27	10,74	19,02	11,48
févr-94	82,5	11,95	44,89	11,72	22,75	12,05
mars-94	8,7	7,65	59,92	7,61	39,01	7,58
avr-94	173,6	0,44	76,56	18,15	44,74	19,23
mai-94	35,8	6,1	109,72	11,97	92,84	11,99
juin-94	6,2	7,12	121,27	7,14	119,26	6,71
juil-94	6,5	1,1	140,98	4,63	192,02	3,78
août-94	3	0,55	130,05	3,02	162,20	2,11
sept-94	12,1	2,14	91,95	2,30	8,27	1,65
oct-94	28,3	2,4	68,03	2,17	53,76	1,67
nov-94	38,7	2,1	44,09	2,33	28,28	1,93
déc-94	14,8	2,7	38,38	2,00	24,29	1,66
janv-95	38	3,5	39,34	2,28	20,46	2,03
févr-95	13,5	3,1	49,38	1,96	30,66	1,76
mars-95	86,2	3,39	58,42	3,50	35,60	3,49
avr-95	28,2	5	77,99	3,09	47,42	3,03
mai-95	3,2	1,98	110,7	2,10	95,94	1,95
juin-95	12,8	1,54	117,86	1,61	104,87	1,45
juil-95	4,1	1,01	134,6	1,11	151,83	0,90
août-95	3,8	0,24	126,63	0,76	141,65	0,55
sept-95	17	0,6	95,01	0,63	9,48	0,47
oct-95	57,2	0,75	72,37	0,82	68,04	0,74
nov-95	17,6	0,65	49,52	0,70	41,81	0,62
déc-95	80	1,13	39,34	1,24	26,07	1,27
janv-96	130	3,059	43,85	3,17	28,85	3,41
févr-96	131,9	6,47	41,58	6,46	17,96	6,81
mars-96	153,9	12,64	58,42	12,40	35,69	12,78
avr-96	50,9	10,59	79,11	9,97	49,97	9,89
mai-96	60,9	9,53	103,93	9,38	74,54	9,43
juin-96	44,5	4,4	122,57	7,68	124,88	7,40
juil-96	11,3	4,8	133,8	4,87	147,63	4,21
août-96	1,2	1,34	124,22	3,03	129,17	2,35
sept-96	38,4	2,79	93,52	2,91	8,86	2,53

oct-96	33,6	0,53	74,07	2,69	74,93	2,45
nov-96	19,2	2,14	51,56	2,27	48,62	2,04
déc-96	40,3	1,9	42,02	2,49	32,49	2,33
janv-97	143,2	6,3	42,22	6,47	24,52	6,59
févr-97	1,6	3,99	49,38	4,17	29,66	3,93
mars-97	16,2	2,1	62,05	3,45	42,38	3,27
avr-97	70,1	1,23	82,78	4,72	57,35	4,79
mai-97	17,1	2,54	105,86	3,52	78,27	3,46
juin-97	3,7	0,2	131,42	2,32	173,70	1,99
juil-97	1	0,2	130,2	1,52	128,26	1,16
août-97	0,1	0,52	124,41	1,00	128,72	0,68
sept-97	54	0,833	93,52	1,21	8,71	0,98
oct-97	40,7	1,47	70	1,26	58,30	1,11
nov-97	78	1,66	48,18	1,93	36,80	1,89
déc-97	87,9	2,9	40,81	3,10	28,39	3,14
janv-98	57,6	3,49	41,79	3,60	23,46	3,59
févr-98	56,2	4,4	48,53	4,15	27,68	4,16
mars-98	62,8	4,92	59,18	4,95	35,57	5,05
avr-98	35,5	4,39	77,99	4,45	45,62	4,55
mai-98	78,7	3	101,32	5,72	65,38	6,18
juin-98	2,3	3,24	123,4	3,44	126,69	3,36
juil-98	1,5	2,7	136,16	2,18	158,91	1,88
août-98	0,6	2,6	128,38	1,41	150,28	1,06
sept-98	13,5	1,6	97,46	1,09	10,44	0,86
oct-98	5,6	0,9	74,4	0,80	74,44	0,63
nov-98	35,5	0,8	49,19	0,87	39,35	0,77
déc-98	14,7	0,69	39,53	0,76	25,25	0,68
janv-99	130	2,18	40,03	2,31	21,14	2,54
févr-99	42	2,36	39,65	2,45	15,23	2,59
mars-99	50	2,8	59,42	2,82	37,06	3,00
avr-99	20	2,3	82,78	2,34	58,08	2,42
mai-99	17	1,87	112,12	1,87	100,41	1,87
juin-99	1,9	1,52	123,4	1,26	127,95	1,14
juil-99	0,2	0,8	134,8	0,83	152,23	0,66
août-99	1	0,42	126,27	0,56	139,09	0,39
sept-99	30,6	0,46	97,29	0,54	10,47	0,42
oct-99	30,3	0,48	71,48	0,52	64,07	0,44
nov-99	83,9	0,89	47,48	0,95	35,46	0,97
déc-99	117,9	2,5	37,17	2,24	21,38	2,45
janv-00	15,62	3,4	35,89	1,82	15,55	1,83
févr-00	18,57	1,58	49,38	1,61	30,55	1,60
mars-00	4,7	1,21	59,92	1,25	38,60	1,23
avr-00	41	0,87	76,85	1,47	44,89	1,58
mai-00	24,9	1,2	107,7	1,34	85,52	1,43

juin-00	2,5	0,566	125,23	0,92	137,68	0,88
juil-00	2,6	0,6	135,58	0,63	157,15	0,52
août-00	0,2	0,44	128,38	0,42	151,57	0,30
sept-00	8,8	0,322	94,28	0,32	9,15	0,22
oct-00	112,5	0,54	74,89	0,79	78,18	0,79
nov-00	72,4	0,52	43,67	1,18	27,09	1,19
déc-00	51,7	0,53	35,26	1,44	28,50	1,41
janv-01	100,1	2,76	42,01	2,78	21,53	2,83
févr-01	80	3,94	60,62	3,91	60,78	3,81
mars-01	17,4	3	66,13	3,01	49,52	2,70
avr-01	10	2,2	81,76	2,26	50,50	1,98
mai-01	24	1,96	105,04	1,98	70,89	1,80
juin-01	5,3	1,35	127,16	1,38	142,47	1,16
juil-01	0,3	0,86	136,16	0,91	155,06	0,67
août-01	0,1	0,56	128,21	0,60	145,99	0,38
sept-01	28,4	0,411	96,08	0,56	9,40	0,39
oct-01	43,4	0,6	69,04	0,63	51,31	0,51
nov-01	80	1,03	46,39	1,08	29,22	1,04
déc-01	27	0,97	42,02	1,03	28,46	0,97

Sikkak les donnée et les résultats de GR2M

Mois	Pluie (mm)	Débit (mm)	ETP Turc		ETP Thorntwaite	
			ETP	Débit simulé	ETP	Débit simulé
janv-64	60	30,22	113,04	21,68	18,5	29,39
févr-64	65,4	29,5	118,21	22,04	31,7	35,13
mars-64	239,3	68,2	134,90	64,55	34,1	83,98
avr-64	118,2	48,3	119,45	46,75	26,1	68,40
mai-64	20,53	18,52	99,50	19,49	89	29,11
juin-64	18,5	16,01	70,38	11,74	90,1	20,18
juil-64	10,95	9,02	50,32	7,82	126,5	11,83
août-64	13,9	4,06	38,48	6,08	100,1	8,23
sept-64	11,4	9,02	35,23	4,92	115,5	5,52
oct-64	9,5	2,1	46,54	3,99	65,2	3,94
nov-64	10,35	4,2	57,12	3,28	53,9	2,77
déc-64	300	43	70,00	43,71	30,5	23,26
janv-65	94,2	33,98	108,23	36,92	16,7	24,31
févr-65	50,3	21,76	121,30	22,25	20,6	20,82
mars-65	46	18,24	135,24	14,82	41	18,90
avr-65	214,7	45	125,46	39,76	42,4	50,41
mai-65	20,3	16,01	96,65	16,95	81,5	23,72
juin-65	17,2	1,23	70,96	10,11	114,2	12,70
juil-65	6	0,53	48,56	6,45	125,2	7,67
août-65	8,4	1,18	40,60	4,74	129,3	4,87
sept-65	11,4	3,2	44,05	3,83	85,8	3,43

oct-65	11,8	3,97	51,39	3,17	47,6	2,64
nov-65	6,7	1,38	53,51	2,52	36,3	2,04
déc-65	21,3	3,12	64,54	2,36	16,7	2,07
janv-66	10	2,31	105,31	1,91	35,3	1,80
févr-66	34,9	2,35	120,83	1,88	43,1	2,18
mars-66	37	1,85	134,38	1,82	27,6	2,60
avr-66	19	1,57	125,48	1,51	25	2,46
mai-66	38	2,65	96,66	1,42	66,7	2,83
juin-66	7	0,63	70,99	1,13	98,4	2,00
juil-66	7,45	0,53	47,67	0,93	123,7	1,32
août-66	6,5	0,63	36,55	0,77	124,4	0,89
sept-66	10,6	1,35	44,05	0,68	101	0,64
oct-66	74,5	0,99	51,39	1,07	66,9	1,04
nov-66	31,5	1,23	53,51	1,24	44,3	1,01
déc-66	112,4	4,2	64,54	3,91	25,8	2,70
janv-67	79,8	8,52	101,91	6,75	25,5	4,40
févr-67	40,7	5,43	113,36	6,17	31	4,57
mars-67	112,54	8,54	136,16	10,31	40,5	4,18
avr-67	157,6	15,89	127,34	20,36	36,4	13,00
mai-67	27,1	8,98	95,37	11,49	63,1	9,12
juin-67	85,1	21,66	65,09	13,58	79,5	11,85
juil-67	7,89	4,88	38,76	8,34	133,9	5,94
août-67	5,2	3,97	34,81	5,82	135,6	3,34
sept-67	11	1,95	37,91	4,70	98,9	2,26
oct-67	148,7	19,2	44,65	17,50	52,8	6,54
nov-67	57	9,59	58,67	17,61	26,4	6,83
déc-67	14	18,46	70,62	11,10	25,5	5,12
janv-68	60,2	13,89	98,88	12,14	23,3	6,99
févr-68	89,7	24,07	135,53	14,93	23,7	11,41
mars-68	192,3	36,1	135,77	33,70	29,5	30,94
avr-68	54,4	13,82	122,26	19,41	42	22,84
mai-68	162,3	39,33	95,37	33,36	51,6	40,50
juin-68	8,4	12,45	74,40	14,61	168,2	16,02
juil-68	2	8,39	46,20	8,42	128,1	8,20
août-68	9,6	2,86	26,26	6,34	108,7	5,24
sept-68	2	2,16	38,87	4,63	93,7	3,27
oct-68	21,8	2,27	42,90	4,46	78,9	2,73
nov-68	106,7	21,76	55,22	11,01	38,8	5,79
déc-68	132	25,36	76,85	24,25	102	11,15
janv-69	64,8	33,57	100,42	20,51	33	10,64
févr-69	139,7	36,1	112,56	32,19	26,9	20,20
mars-69	57,4	28,34	130,44	20,42	38,5	17,49
avr-69	119	25,08	123,45	24,67	36,4	26,50
mai-69	74,5	19,85	93,71	19,93	60,1	24,34

juin-69	42,2	5,47	72,72	14,13	77,6	17,96
juil-69	9	3,01	47,65	8,64	111,3	10,23
août-69	5,9	5,99	35,04	6,01	113,7	6,22
sept-69	12,3	1,18	41,58	4,86	92,4	4,38
oct-69	20,3	7,28	42,38	4,47	77,6	3,53
nov-69	71	10,57	57,65	7,30	48,3	5,11
déc-69	190,8	33,98	70,62	30,40	26	17,65
janv-70	75,6	21,66	102,90	25,95	32,3	17,62
févr-70	6,3	1,39	113,36	11,84	29,4	10,92
mars-70	94,5	14,52	134,00	14,85	27,3	17,99
avr-70	61,7	12,53	125,52	12,14	41,9	18,10
mai-70	18,4	6,9	89,71	7,34	65,4	12,28
juin-70	8,5	4,37	70,99	4,70	79,6	7,58
juil-70	7,6	5,85	46,43	3,31	124,1	5,03
août-70	6,9	3,25	30,45	2,51	126,5	3,26
sept-70	37,5	4,2	41,15	2,72	78,2	3,17
oct-70	22,3	1,67	43,64	2,60	71,1	2,59
nov-70	83,3	11,04	50,85	5,06	44,7	4,30
déc-70	116,6	22	73,85	12,35	18,4	8,87
janv-71	148	30,15	90,15	27,42	29	18,84
févr-71	6,1	11,06	112,77	12,20	29,4	10,87
mars-71	128,1	20,35	129,73	20,23	25,9	22,17
avr-71	106,7	22,45	103,24	22,40	41,7	27,65
mai-71	132,1	30,56	97,76	30,27	47	36,99
juin-71	15,8	6,9	68,27	14,91	82,5	19,01
juil-71	6,1	3,36	52,19	8,89	111,9	10,90
août-71	7,5	2,75	32,10	6,39	64,8	7,50
sept-71	1	3,18	37,66	4,58	112,6	4,70
oct-71	9,6	2,1	41,56	3,80	66,7	3,53
nov-71	3,6	6,43	47,25	2,97	69,9	2,51
déc-71	49,2	14,76	71,12	3,90	24,2	3,35
janv-72	119,2	12,12	93,30	9,73	22,2	8,39
févr-72	79,1	12,3	111,06	11,86	30,1	11,11
mars-72	141,2	20,3	129,32	21,23	31	21,82
avr-72	63,4	15,63	121,53	15,79	35,9	19,59
mai-72	80,5	14,23	94,97	15,27	51,9	21,64
juin-72	4,1	7,68	72,69	8,06	77,6	11,79
juil-72	5,2	4,9	39,34	5,26	109,7	7,29
août-72	0,66	4,05	32,62	3,66	113	4,42
sept-72	27,3	3,84	33,92	3,64	100,2	3,80
oct-72	4,9	2,08	42,22	2,86	81	2,52
nov-72	154,8	13	51,19	12,34	31	8,37
déc-72	51	5,53	67,60	12,56	24,7	8,32
janv-73	96,2	16,25	102,00	18,11	20,8	13,22

févr-73	140,2	55,22	114,73	29,43	19,5	24,94
mars-73	278,8	87,92	132,43	82,71	25,1	71,00
avr-73	77,8	50	127,04	39,26	40,9	45,98
mai-73	5,3	6,03	88,99	15,51	92,6	22,21
juin-73	14	6,7	67,99	9,62	85,8	15,04
juil-73	4,1	4,48	46,19	6,26	237,9	7,44
août-73	8,4	3,38	32,74	4,78	135,6	4,36
sept-73	76,9	3,37	33,81	8,51	49,1	5,89
oct-73	45,3	9,77	36,06	9,78	63,8	5,60
nov-73	46,5	2,63	47,96	10,94	46,3	5,69
déc-73	28,3	7,4	71,90	9,22	23,7	5,13
janv-74	2,4	2,54	106,10	5,61	29,8	3,71
févr-74	182,2	8,68	114,42	19,78	21,1	15,89
mars-74	253,7	50,2	133,27	60,26	26,2	48,80
avr-74	117,9	45,89	124,98	43,98	32,4	45,42
mai-74	9,6	20,49	97,74	16,78	73,1	22,24
juin-74	15,1	5,55	63,10	10,18	82,7	15,03
juil-74	0,2	4,2	47,74	6,24	121,4	8,59
août-74	5,6	3,99	31,07	4,61	124,3	5,43
sept-74	13	3,27	39,83	3,92	109,2	3,84
oct-74	37,1	3,46	38,29	4,54	48,4	3,85
nov-74	32,7	4,09	49,87	4,87	49,1	3,72
déc-74	149,5	1,33	67,32	17,01	19,6	11,15
janv-75	14,8	6,68	79,89	10,39	30,5	7,69
févr-75	97,7	21,54	113,83	15,42	28,8	13,26
mars-75	162,3	35,12	138,23	29,45	28,9	28,42
avr-75	226,6	60,2	126,88	59,21	35,9	58,74
mai-75	65,6	20,21	95,60	31,37	30,8	38,95
juin-75	8	7,32	63,36	14,74	81,9	20,73
juil-75	15	8,92	46,32	10,12	143,8	12,79
août-75	3	0,2	36,36	6,87	134,1	7,16
sept-75	51,1	14,63	40,01	8,91	100,9	7,26
oct-75	61,4	14,9	42,95	12,02	49,5	8,04
nov-75	34,2	14,22	51,56	11,00	45,2	6,98
déc-75	30,4	9,72	69,60	9,49	29,7	6,42
Les données de la validation						
janv-76	30,20	11,0	99,62	7,82	16,71	6,37
févr-76	86,11	6,1	118,45	10,67	19,28	10,99
mars-76	29,85	7,8	134,38	7,37	27,94	9,57
avr-76	63,52	3,0	126,85	7,06	38,1	11,96
mai-76	80,21	5,7	92,80	7,98	71,43	14,76
juin-76	10,12	1,7	71,61	5,12	114,39	8,28
juil-76	9,89	1,2	43,59	3,67	155,54	4,89
août-76	7,76	0,9	34,54	2,80	154,6	2,89

sept-76	12,79	1,7	33,64	2,36	91,97	1,96
oct-76	45,32	2,4	39,43	2,96	71,61	2,04
nov-76	10,72	2,1	50,60	2,52	32,1	1,52
déc-76	73,58	5,1	69,22	4,34	21,69	2,62
janv-77	86,19	7,7	100,11	7,43	21,71	4,81
févr-77	26,14	3,2	114,11	5,70	31,68	4,31
mars-77	18,77	5,1	127,49	4,09	52,13	3,65
avr-77	4,30	8,9	119,88	2,73	67,52	2,61
mai-77	10,20	4,7	93,90	1,99	72,63	2,04
juin-77	6,62	1,2	66,13	1,50	99,53	1,47
juil-77	2,14	1,0	40,23	1,15	125,35	0,97
août-77	1,27	0,9	40,16	0,90	122,18	0,62
sept-77	4,28	0,7	37,37	0,74	96,55	0,42
oct-77	30,62	1,2	47,38	0,72	54,57	0,41
nov-77	58,30	2,4	62,77	0,97	25,52	0,64
déc-77	24,18	1,9	83,30	1,00	32,87	0,64
janv-78	15,6	1,7	30,5	0,94	17,05	0,61
févr-78	98,24	8,6	28,8	2,51	35,3	1,78
mars-78	152,36	6,0	28,9	13,17	37,51	6,51
avr-78	230,2	5,5	35,9	63,52	42,67	24,56
mai-78	69,2	3,3	30,8	47,64	66,08	19,39
juin-78	10	1,3	81,9	22,71	89,34	10,61
juil-78	14	1,1	143,8	12,73	158,07	6,45
août-78	2	0,8	134,1	6,80	144,63	3,56
sept-78	51,1	0,7	100,9	6,42	94,79	3,64
oct-78	59,85	1,2	49,5	6,97	68,67	4,07
nov-78	38,2	1,8	45,2	6,65	37,58	3,83
déc-78	30,34	5,2	29,7	6,33	36,45	3,57
janv-79	26,3	1,9	44,25	5,96	32,38	3,38
févr-79	166,3	19,3	45,61	23,67	26,2	12,22
mars-79	43	16,6	50,47	19,13	25,25	10,70
avr-79	38,5	8,6	74,46	15,56	43,96	9,82
mai-79	21,5	5,4	104,63	10,37	80,49	7,45
juin-79	2	3,6	119,94	5,87	116,59	4,46
juil-79	0,8	1,3	133,5	3,60	148,21	2,62
août-79	0,1	1,1	126	2,38	147,55	1,53
sept-79	36,9	1,2	96,69	2,05	105,15	1,42
oct-79	77,9	1,4	68,45	2,63	58,06	2,12
nov-79	48	3,3	45,16	3,01	33,11	2,37
déc-79	24,3	5,5	34,01	2,89	18,87	2,18
janv-80	11,4	4,3	39,57	2,48	22,66	1,84
févr-80	110	10,7	47,66	6,75	29,32	4,98
mars-80	101,5	10,6	58,16	13,74	37,6	8,93
avr-80	34,2	7,7	74,92	11,14	44,05	7,55

mai-80	36,6	2,4	100,72	9,23	69,4	6,82
juin-80	3,6	3,6	121,05	5,39	120,99	4,06
juil-80	0,7	1,1	132,99	3,35	145,86	2,36
août-80	0,5	1,0	128,97	2,24	165,36	1,36
sept-80	25,2	1,0	94,28	1,79	94,33	1,09
oct-80	94,5	1,1	70,38	2,58	63,64	1,98
nov-80	61	1,3	44,87	3,41	31,84	2,52
déc-80	82	5,6	36,76	6,22	22,89	4,17
janv-81	24,2	0,8	34,83	5,81	15,54	3,73
févr-81	54,1	2,1	44,28	7,77	23,05	4,97
mars-81	44,7	1,0	63,28	8,51	48,87	5,50
avr-81	71,6	2,6	80,19	11,35	54,53	7,52
mai-81	5,1	3,6	104,35	6,63	77,99	4,70
juin-81	4	1,0	120,32	4,16	116,67	2,97
juil-81	0,8	0,4	130,44	2,70	132,42	1,80
août-81	2	0,4	123,65	1,89	134,36	1,11
sept-81	2,2	0,9	98,62	1,38	113,38	0,70
oct-81	11,9	0,6	72,46	1,09	70,23	0,52
nov-81	28	0,5	48,18	0,96	39,59	0,50
déc-81	178,1	0,9	34,59	4,37	18,86	3,09
janv-82	16	0,3	42,84	3,95	24,78	2,51
févr-82	53	2,5	43,91	5,56	19,42	3,43
mars-82	8,7	2,1	61,23	4,29	39,14	2,69
avr-82	58,8	1,5	81,25	5,76	51,9	3,88
mai-82	54	1,2	106,39	6,41	77,93	4,54
juin-82	2,9	0,6	124,22	3,98	129,02	2,69
juil-82	0,96	0,5	134,9	2,61	149,84	1,57
août-82	3,4	0,4	125,72	1,84	140,79	0,96
sept-82	9	0,4	97,29	1,39	102,15	0,65
oct-82	0,5	0,8	75,52	1,05	78,14	0,41
nov-82	50	2,3	49,68	1,02	39,96	0,51
déc-82	19	4,6	42,61	0,92	31,86	0,45
janv-83	36,3	1,3	36,92	1,00	18,91	0,56
févr-83	27,3	2,1	43,41	1,06	22,45	0,63
mars-83	13,9	2,5	62,5	1,00	47,91	0,58
avr-83	2,5	1,5	82,02	0,83	60,2	0,44
mai-83	11,1	1,0	105,18	0,74	81,63	0,38
juin-83	1,2	1,3	122,88	0,61	128,85	0,26
juil-83	0,89	0,5	132,05	0,50	140,85	0,17
août-83	0,2	0,4	123,16	0,42	132,83	0,11
sept-83	4	0,3	97,71	0,36	109,69	0,07
oct-83	31,8	0,3	73,91	0,33	76,92	0,07
nov-83	60,1	0,3	47,21	0,40	37,86	0,13
déc-83	41	0,8	35,91	0,52	21,71	0,18

janv-84	42,3	3,3	39,11	0,75	19,67	0,27
févr-84	24,7	1,7	43,79	0,90	20,46	0,32
mars-84	30	4,8	56,59	1,13	31,48	0,41
avr-84	8,1	3,1	84,13	1,02	61,66	0,35
mai-84	95,9	6,0	99,81	2,42	62,91	1,08
juin-84	0,6	0,6	117,86	1,78	103,76	0,72
juil-84	9,4	0,7	136,25	1,41	159,98	0,51
août-84	0,6	0,6	123,55	1,08	131,52	0,32
sept-84	0,4	0,5	100,04	0,84	118,98	0,20
oct-84	0,99	0,4	75,6	0,68	80,65	0,13
nov-84	19,3	1,2	52,73	0,58	52,18	0,11
déc-84	73,2	1,8	39,06	0,75	24,98	0,22
janv-85	46,7	4,9	37,91	1,01	17,28	0,33
févr-85	14	11,0	52,34	0,98	35,98	0,31
mars-85	36	15,0	56,32	1,22	30,08	0,42
avr-85	25,7	7,7	83,15	1,31	57,78	0,47
mai-85	38,5	1,6	104,9	1,52	74,81	0,60
juin-85	12,8	2,1	121,6	1,30	117,97	0,48
juil-85	0,7	1,2	136,59	1,00	161,06	0,31
août-85	0,8	1,1	126,99	0,79	149,45	0,19
sept-85	10	0,6	99,18	0,66	113,19	0,14
oct-85	3	0,4	70,38	0,54	59,02	0,09
nov-85	87,8	1,1	50,24	0,73	42,51	0,21
déc-85	17,7	2,0	39,34	0,72	24,82	0,20
janv-86	50,6	7,1	41,04	1,04	22,27	0,33
févr-86	96,2	20,6	47,33	2,99	25,59	1,03
mars-86	90,6	2,9	58,55	6,98	34,47	2,39
avr-86	32,5	2,4	73,85	6,64	37,82	2,44
mai-86	5,7	2,7	109,6	4,41	89,81	1,73
juin-86	5,9	1,5	118,91	3,03	106,71	1,20
juil-86	0,4	1,9	134,9	2,07	151,16	0,75
août-86	4,2	1,0	125,48	1,52	140,71	0,48
sept-86	6,7	0,9	100,2	1,16	118,91	0,32
oct-86	0,1	0,9	74,4	0,90	74,41	0,20
nov-86	37,5	2,5	51,71	0,82	47,61	0,22
déc-86	27,4	3,9	39,72	0,77	25,79	0,22
janv-87	30,8	1,3	40,59	0,79	18,68	0,26
févr-87	97,2	2,0	47,55	1,91	22,87	0,86
mars-87	5,8	0,6	64,37	1,63	43,56	0,68
avr-87	3,7	1,7	85,2	1,32	58,53	0,52
mai-87	13,5	1,8	107,7	1,16	77,5	0,46
juin-87	4,9	0,6	121,82	0,94	113,03	0,34
juil-87	2,1	0,3	133,4	0,75	137,35	0,23
août-87	3,5	0,3	127,25	0,62	145,95	0,15

sept-87	21,1	0,8	98,81	0,54	106,25	0,13
oct-87	45,4	1,1	74,56	0,54	70,22	0,16
nov-87	99,5	1,1	47,21	1,12	30,47	0,45
déc-87	30,2	1,2	53,18	1,33	74,31	0,48
janv-88	23,4	0,5	44,63	1,44	26,62	0,48
févr-88	34,1	1,0	46,88	1,76	22,34	0,60
mars-88	5,5	8,1	62,73	1,49	40,28	0,48
avr-88	34	7,1	84,13	1,68	56,6	0,61
mai-88	84,1	5,4	107,57	3,12	78,4	1,37
juin-88	4,2	1,9	119,03	2,26	102,51	0,93
juil-88	0,9	1,3	135,19	1,63	148,87	0,58
août-88	5,6	1,0	129,64	1,24	163,03	0,38
sept-88	7,8	0,3	101,63	0,98	124,19	0,25
oct-88	31,7	0,4	75,21	0,87	74,14	0,23
nov-88	18,9	0,6	49,76	0,76	38,1	0,19
déc-88	32,7	0,3	43,02	0,76	31,02	0,21
janv-89	21,7	3,5	39,22	0,75	18,04	0,22
févr-89	40,6	0,5	47,66	0,93	24,68	0,32
mars-89	110,2	2,9	61,7	2,92	39,27	1,21
avr-89	54	6,6	79,52	4,14	46,84	1,72
mai-89	41,9	5,1	103,5	4,43	68,48	1,96
juin-89	71,6	1,1	122,99	5,77	121,94	2,78
juil-89	4,8	0,8	138,29	3,65	169,67	1,61
août-89	0,5	0,6	131,57	2,40	178,34	0,90
sept-89	6,58	0,8	98,04	1,74	105,09	0,56
oct-89	32,51	0,6	76,14	1,49	80,1	0,49
nov-89	16,25	0,8	51,18	1,23	43,91	0,38
déc-89	33,5	0,9	35,15	1,20	16,31	0,40